



République algérienne démocratique et populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي الجزائر
Université d'Oran 2
Institut de maintenance et sécurité industrielle



MEMOIRE :

Pour l'obtention du diplôme de master 2
En électromécanique

**Modélisation et simulation d'un système
hybride éolien-photovoltaïque-diesel**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Bendoukha Adel Mohamed
Adda Zakaria**

Devant le jury composé de :

Mme. Talhi Mama

Université d'Oran 2 Président

Mr. Belkacem Belkacem

Université d'Oran 2 Encadreur

Mr. Bouhamri Noureddine

Université d'Oran 2 Examineur

Année universitaire 2022 - 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de mémoire, le Professeur Belkacem, pour son encadrement précieux tout au long de ce travail. Vos conseils éclairés, votre expertise et votre soutien constant ont joué un rôle essentiel dans l'achèvement de ce mémoire.

Je souhaite également adresser mes remerciements chaleureux à tous les enseignants de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle. Votre enseignement de qualité m'a fourni les connaissances et les compétences nécessaires pour mener à bien cette recherche. Je suis reconnaissant pour les fondations solides que vous m'avez aidé à construire.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mes parents pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant et leurs sacrifices pour que je puisse poursuivre mes études. Votre amour et votre confiance en moi sont ma plus grande source de motivation.

Mes amis méritent également une mention spéciale. Vos encouragements, vos discussions stimulantes et vos moments de détente bien mérités ont rendu ce voyage académique plus agréable et m'ont aidé à rester équilibré.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Chacune de vos contributions a joué un rôle essentiel dans ce processus.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien et l'apport de chacun d'entre vous. Je vous en suis profondément reconnaissant.

Sommaire

Remerciements	i
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur le système d'énergie multi-source PV-E-D	
I.1 Introduction	3
I.2 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie	3
I.3 Définition et mission des systèmes d'énergie multi-sources.....	4
I.4 Présentation du système hybride choisie.....	6
I.5 Principaux éléments d'un système PV-E-D	6
I.5.1 L'installation photovoltaïque	7
I.5.1.1 Cellule photovoltaïque	7
I.5.1.2 Caractéristique électrique.....	9
I.5.1.3 Le module photovoltaïque	10
I.5.1.3.1 Regroupement des cellules en série.....	10
I.5.1.3.2 Regroupement des cellules en parallèle.....	11
I.5.1.3.3 Regroupement des cellules série et parallèle.....	12
I.5.1.4 Le gisement solaire.....	12
I.5.1.4.1 Mouvements de la Terre	14
I.5.1.4.2 Mouvement apparent du Soleil.....	14
I.5.1.4.3 Repérage de la position du Soleil	15
I.5.2 L'installation éolienne.....	17
I.5.2.1 Principaux composants d'une Eolienne	17
I.5.2.2 Le gisement éolien	19
I.5.2.3 Différents types des turbines éoliennes	20
I.5.2.3.1 Eoliennes à axe vertical	20
I.5.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal	21
I.5.2.4 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	22
I.5.2.5 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne	25
I.5.2.6 Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	26
I.5.2.6.1 Eoliennes à vitesse fixe	26
I.5.2.6.2 Eoliennes à vitesse variable commandées par le stato.....	27
I.5.2.6.3 Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone	27
I.5.3 Générateur diesel	28
I.5.3.1 Réseaux autonome alimenté par centrale diesel	28
I.5.3.2 Fonctionnement des groupes diesel	29
I.5.4 Systèmes de stockage	29

I.5.5 Convertisseurs	30
I.5.6 Charges	31
I.5.7 Système d'exploitation	31
I.6 Etude de différentes structures du système d'énergie hybride.....	32
I.6.1 Configuration à bus à DC	33
I.6.2 Configuration à bus à AC	34
I.6.3 Configuration à mixte à bus à DC/AC.....	35
I.7 Conclusion	36
Références bibliographiques	37

Chapitre II : Modélisation des éléments du système

II. Introduction	39
II.1 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	42
II.2.1 Modélisation du panneau photovoltaïque	44
II.2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	44
II.2.3 modélisation de la puissance photovoltaïque	45
II.2.4 éclairage solaire	46
II.2.5 surface des panneaux solaire.....	48
II.2.6 paramètres caractéristique d'une cellule solaire	49
II.2.7 modèle simplifié du module photovoltaïque	46
II.3 Modélisation de la chaîne de production éolienne	51
II.3.1 Modélisation de l'interférence du vent sur une éolienne	53
II.3.2 Modèle de la turbine éolienne	54
II.3.3 Modèle du multiplicateur	55
II.3.4 Modèle de l'arbre	56
II.3.5 Modèle de l'actionneur des pales	57
II.3.6 Modélisation de la génératrice	58
II.4 modèle de ferme éolienne simplifiée	59
II.4.1 bloc de puissance éolienne	61
II.4.2 vitesse de vent	61
II.4.3 modèle simplifié du module Wind farm	62
II.5 Modélisation du groupe diesel	64
II.5.1 la modélisation de la partie mécanique d'un groupe diesel	65
II.5.2 le régulateur de vitesse.....	66
II.5.3 Modèle de la tension de la machine synchrone.....	67
II.5.4 Modèle simplifié de la machine synchrone.....	68
II.6 Modélisation de la charge alimentée par notre système.....	71
II.6.1 charge résidentielle	71
II.6.2 machine asynchrone	71
II.6.3 véhicules électriques V2G.....	72
II.7 simulation du système pvéd sous matlab	74
II.8 conclusion	74
II.9 Références bibliographique	75

Chapitre III: Dimensionnement et optimisation Technico-économique

III.1 Introduction	78
III.2 contextes de la simulation	78
III.2.1 générateur diesel.....	78
III.2.2 ferme photovoltaïque.....	78
III.2.3 ferme éolienne	78
III.2.4 systèmes véhicule grid V2G.....	78
III.2.5 charges résidentielles.....	79
III.2.6 explications des paramètres de simulation et des condition initiales	78
III.2.7 scénarios de simulation	82
III.3 simulation de la ferme photovoltaïque	82
III.4 analyse de résultats et commentaire	85
III.4.1 simulation de la ferme éolienne.....	86
III.4.2 analyse des résultats et commentaires.....	88
III.4.3 simulation du générateur diesel.....	91
III.5 analyse des résultats et commentaires	94
III.5.1 analyse des résultats et commentaires de la charge	96
III.5.1.1 Conclusion et analyse général associée à la génération d'Énergie	84
Conclusion générale.....	95

Liste des figures

Figure I-1 : Principaux éléments d'un système PV-E-D	6
Figure I-2 : L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire	8
Figure I-3 : Différents types de cellules photovoltaïques	9
Figure I-4 : circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I-5 : Caractéristique typique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I-6 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	12
Figure I-7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle	12
Figure I-8 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protections	13
Figure I-9 : Spectres solaires	14
Figure I-10 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil	14
Figure I-11 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude	15
Figure I-12 : Composantes du rayonnement solaire au sol.....	17
Figure I-13 : Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne.....	18
Figure I-14 : Composantes principales d'une Eolienne.....	19
Figure I-15 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol	20
Figure I-16 : Eolienne à axe vertical (structure de Darrieus)	21
Figure I-17 Eolienne à axe vertical (structure de Savonius)	22
Figure I-18 : Eoliennes à axe horizontal	23
Figure I-19 : Taille des hélices en m et puissance en kW	23
Figure I-20 : Tube de courant autour d'une éolienne	24
Figure I-21 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	25
Figure 1-22 diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de vitesse de vent.....	27
Figure I-23 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage	27
Figure I-24 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	28
Figure I-25 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	29
Figure I-26 : Configuration du générateur diesel	29
Figure I-27 : Tension de « cut-off » d'une batterie	31
Figure I-28 : Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb	31
Figure I-29 : Système d'exploitation pour un système PV-E-D	33
Figure I-30 : Configuration à bus à DC	34
Figure I-31 : Configuration à bus à AC	35
Figure I-32 : Configuration à bus mix AC/CC	37
Figure II-1 : Chaîne production photovoltaïque	42
Figure II-2 : Recherche du MPP par la méthode de l'incrément de la conductance.....	43
Figure II-3 : Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque.....	43
Figure II-4 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	44
Figure II-5 : Schéma général du bloc PV Power est utilisé pour simuler la production.....	45
Figure II-6 : schéma du bloc de changement de IRRADIANCE TABLE DATA.....	46

Figure II-7 : (Signal disturbance (mask) for irradiation	47
Figure II-8 : La relation entre l'efficacité et la surface du panneau solaire	48
Figure II-9 : représente les paramètres d'efficacité de de surface de des panneaux	48
Figure II-10 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque [5].....	49
Figure II-11 : de la Puissance Solaire à partir du bloc de Données convertis en	51
Figure II-12 : qui représente la relation mathématique qui est généré dans le bloc photovoltaïque pour fournir une source de courant contrôlé.	52
Figure II-13 : Modèle de la turbine éolienne.....	53
Figure II-14 : Configuration d'une éolienne.....	55
Figure II-15 : orientation des pales	57
Figure II-16 : : Modèle sous Simulink du système de calage de pale.....	57
Figure -17 Modèle sous Simulink du système de calage de pale.....	58
Figure II-18 : schéma de bloc de Déclenchement en Cas de Vent Maximal	60
Figure II-19 Bloc des Paramètres Nominaux et Maximaux du fonctionnement de l'éolienne	60
Figure II-20 : Schéma général du bloc Wind Power utilisé pour simuler la production d'énergie électrique par notre ferme d'éolienne en réponse aux condition météorologique vitesse du vent	61
Figure II-21 : de modélisation du profile de vitesse de vent sur Matlab Simulink	62
Figure II-22 : de la Puissance de la ferme d'éolienne à partir du bloc de Données convertis en Courants dans Simscape Power Systems	63
Figure II-23 : représente la relation mathématique qui est généré dans le bloc wind power farm pour fournir une source de courant contrôlé	63
Figure II-24 : Modèle de la partie mécanique du groupe diesel	65
Figure II-25 : Modèle Simulink du régulateur de vitesse du moteur diesel	66
Figure II-26 : block Régulateur de Tension de la Machine Synchrone et l'Excitatrice	66
Figure II-27 : Modèle équivalent d'un enroulement	69
Figure II-28 : Modèle Simulink du groupe diesel	70
Figure II-29 : La modélisation de la charge résidentielle	71
Figure II-30 : Bloc de configuration des paramètres de la machine asynchrone	72
Figure II-31 : la modélisation des Profils des Utilisateurs de Voitures	73
Figure II-32 : Modèle Simulink d'un système multi-sources PVED	74
Figure III-1 : variation de la vitesse de vent au cours de la journée.....	81
Figure III-2 : résultats de la tension de production de la ferme photovoltaïque Période	82
Figure III-3 : : résultats de la courant de production de la ferme photovoltaïque	83
Figure III-4 résultats de la puissance active de production de la ferme photovltaique .	83
Figure III-5 résultats de la puissance réactive de production de la ferme photovoltaïque.....	84
Figure III-6 : résultats de la puissance totale de production de la ferme.....	84
Figure III-7 : résultats de courant de production de l'éolienne.....	87
Figure III-8 : résultats de la tension de production de l'éolienne	88
Figure III-9 : résultats de puissance active de production de l'éolienne	88

Figure III-10 : résultats de puissance réactive de production de l'éolienne	89
Figure III-11 : résultats de puissance totale de production de l'éolienne	89
Figure III-12 : : résultats de la tension de production de le générateur diésel.....	92
Figure III-13 : résultats de courant de production du générateur diésel.....	93
Figure III-14 : résultats de puissance active de production du générateur diésel	93
Figure III-15 : résultats de puissance totale de production du générateur diésel...	94
Figure III-16 : résultats de tension de production du asm.....	96
Figure III-17 : résultats de courant de production du asm.....	96
Figure III-18 : résultats de la puissance totale de production du asm..	97
Figure III-19 : résultats de la tension de production du la charge résidentielle..	97
Figure III-20 : résultats de courant de production du la charge résidentielle..	98
Figure III-21 : résultats de la puissance active de production du la charge résidentielle	98
Figure III-22 : résultats de la puissance réactive de production du la charge résidentielle	99
Figure III-23 : résultats de la puissance totale de production du la charge résidentielle	99
Figure III-24 : résultats de courant du système de véhicules électriques (V2G)	100
Figure III-25 : résultats de tension du système de véhicules électriques (V2G)	100
Figure III-26 : résultats de puissance totale du système de véhicules électriques (V2G)	101
Figure III-27 : résultats de la somme d'énergie active de la consommation et production active	102
Figure III-28 : résultats de mesure de la consommation et production d'énergie réactive	102
Figure III-29 : résultats de la somme d'énergie reactive de la consommation	103
Figure III-30 : résultats de mesure de la consommation et production d'énergie Total	103
Figure III-31 : résultats de la somme de la consommation et production d'énergie Total	104

Liste des tableaux

Tableau I-1	: Répartition de la puissance installée par application en Algérie	3
Tableau I-2	: Classification des systèmes multi-sources par gamme de puissance	5
Tableau I-3	: Rendement des modules en fonction des différentes technologies	9

Nomenclature

1. Glossaire

R_s	Résistance série	Ω
R_p	Résistance parallèle	Ω
V_{co}	Tension en circuit ouvert	V
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
N_s	Nombre des cellules en série	-
$V_{CO_{N_s}}$	Somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série	V
$I_{CC_{N_s}}$	Courant de court-circuit de N_s cellules en série	A
N_p	Nombre des cellules en parallèle	-
$I_{CC_{N_p}}$	Somme des courants en circuit ouvert de N_p cellules en parallèle	A
$V_{CO_{N_p}}$	Tension de court-circuit de N_p cellules en parallèle	V
w	déclinaison	°
j	Numéro du jour de l'année	-
L	Latitude	°
δ	Angle horaire	°
TS	Heure solaire	heure
h	hauteur du Soleil	°
a	Azimut	°
D	Rayonnement diffus	W/m^2
i	Inclinaison du capteur par rapport au sol	°
γ	Orientation du capteur par rapport au sud	°
$G_{i,\gamma}$	Eclairement global	W/m^2
$S_{i,\gamma}^*$	Composante utile de l'éclairement direct	W/m^2
I_{δ}^*	Rayonnement direct au sol	W/m^2
D_i^*	Rayonnement diffus reçu par le plan d'inclinaison i	W/m^2
D_0^*	Rayonnement diffus atmosphérique sur un plan horizontal	W/m^2
T_L	Facteur de trouble atmosphérique	-
V_1	Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur	m/s
V_2	Vitesse en aval de l'aérogénérateur	m/s
ρ	Densité d'air	kg/m^3
S	Surface des pales	m^2
m	Masse d'air en mouvement	kg
P_m	Puissance extraite	W
P_{mt}	Puissance total d'air	W
$P_{méc_max}$	Puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne	W
C_p	Coefficient de puissance	-
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation avant multiplicateur	rad/s
R	Rayon de l'éolienne	m
P_n	puissance nominale d'une éolienne	W
V_n	Vitesse de vent nominale	m/s
V_d	Vitesse de démarrage d'une éolienne	m/s
V_m	Vitesse d'arrêt d'une éolienne	m/s
V_v	Vitesse du vent	m/s
G	Eclairement dans les panneaux solaires	W/m^2
T_j	Température des panneaux solaires	°K
R_s	Résistance série d'une cellule photovoltaïque	Ω
R_p	Résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque	Ω
I	Courant générer par la cellule photovoltaïque	A
I_{ph}	Photo-courant créé par une cellule photovoltaïque	A
I_d	Courant circulant dans la diode	A
I_o	Courant de court de saturation	A
T	Température de la jonction des cellules PV	°K
K	Constante de Boltzman	J/K°

q	Charge élémentaire	C
A	Facteur d'idéalité de la jonction	V
V	Tension de sortie	V
I_p	Courant circulant dans la résistance R_p	A
I_{cc}	Courant de court circuit	A
V_{co}	Tension à vide	V
V_m	Tension au point de fonctionnement	V
I_m	Courant au point de fonctionnement	A
P_{in}	Puissance incidente	W
S_c	Surface de la cellule	m ²
η	Rendement maximal	%
FF	Facteur de forme	
I_{cc}	Courant de court circuit	A
V_{co}	Tension du circuit ouverte	V
G_{ref}	Eclairement dans les panneaux solaires aux conditions standards	W/m ²
T_{ref}	Température des panneaux solaires aux conditions standards	°K
I_{cc}	Courant de court circuit aux conditions prévu	A
V_{co}	Tension du circuit ouverte aux conditions prévue	V
I_m	Courant au point de fonctionnement aux conditions prévu	A
V_m	Tension au point de fonctionnement aux conditions prévue	V
I_{cc_ref}	Courant de court circuit aux conditions standards	A
V_{co_ref}	Tension du circuit ouverte aux conditions standards	V
I_{m_ref}	Courant au point de fonctionnement aux conditions standards	A
V_{m_ref}	Tension au point de fonctionnement aux conditions standards	V
λ	Rapport de vitesse	-
β	Angle de calage des pales	°
Ω_t	Vitesse angulaire mécanique de la turbine	rad/s
R	Rayon de la turbine = longueur de pale	m
C_t	Couple mécanique sur l'axe de la turbine	N.m
C_{mec}	Couple mécanique sur l'axe du générateur	rad/s
G	Rapport de multiplication	-
Ω_{mec}	Vitesse du générateur	rad/s
J	Inertie totale des parties tournantes	kg.m ²
C_t	Couple total de l'éolienne	N.m
f_v	Coefficient de frottements visqueux	N. m. s/rad
C_{em}	Couple électromagnétique du générateur	N.m
τ_β	Constante de temps de l'actionneur	s
β_{min}, β_{max}	Limites de l'angle de calage des pales	°
s	Opérateur de Laplace	-
β_{ref}	Référence d'angle reçue du processus de commande de la puissance électrique	°
L_d, L_q	Respectivement les inductances directe et quadratique du stator	H
V_d, V_q	Respectivement tension statoriques direct et quadratique	V
I_d, I_q	Respectivement Tension statoriques direct et quadratique	A
Φ_d, Φ_q	Respectivement flux statoriques direct et quadratique	Wb
Φ_e	Flux d'aimant permanent par pôle	Wb
ω	Pulsation	Rad/s
R_a	Resistance statorique	Ω
ω_s	Pulsation statorique	Rad/s
L_d, L_q	Les inductances directe et en quadratique du stator	H
$[V_{abc}]$	Matrice des tensions de sortie de la génératrice	V
$[\Phi_{abc}]$	Matrice des flux	Wb
n_b	Eléments de batteries	-
R_b	Résistance interne d'un élément batteries	Ω
E_b	Tension à vide d'un élément batteries	V
\checkmark	Capacité d'une batterie	Ah
\bar{I}	courant moyen	A
Q	Quantité de charge manquante à la batterie	Ah
V_F	Force électromotrice	V
b	Tension empirique	V

$C_{bat}(t)$	Quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t)	Ah
$C_{bat}(t-1)$	Quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t-1)	Ah
σ	Taux horaire de la charge spontanée	-
$P_{C\text{bat}}$	Puissance fournie à la batterie pour le chargement	W
$P_L(t)$	Charge demandée au temps t	W
η_{ond}, η_{bat}	Rendements de l'onduleur et de la batterie	%
C_{bat}	La capacité de stockage de la batterie	Ah
N_a	Le nombre de jours d'autonomie	Jour
V_{Bat}	La tension de la batterie	V
T_{Dm}	Couple mécanique du moteur diesel	N.m
T_{D1}	Constante de temps du moteur diesel	s
T_{D2}	Délai de combustion du moteur diesel	s
$x_2(t)$	Couple moteur diesel	N.m
T_{De}	Couple électromagnétique de la génératrice synchrone	N.m
K_{Dm}	Gain du moteur diesel	-
z	Indice de consommation de carburant	
H_D	Inertie de la transmission mécanique du groupe diesel	N.m
D_D	Coefficient de frottement équivalent du groupe diesel	-
ω_{Dm}	Vitesse mécanique (moteur diesel)	Rad/s
K_{DP}	Gain proportionnel du régulateur de vitesse moteur diesel	-
K_{DI}	Gain intégral du régulateur de vitesse moteur diesel	-
K_{Dr}	Paramètre Droop du régulateur de vitesse du moteur diesel	-
T_m	Couple mécanique	N.m
ω_N	Vitesse mécanique nominale (Moteur diesel)	Rad/s
$x(t)$	Vecteur des variables d'état d'un système (modèle d'état)	-
$y(t)$	Vecteur des variables de sortie d'un système (modèle d'état)	-
ω_{Dm}^{ref}	Référence du régulateur de vitesse (Moteur diesel)	Rad/s
K	Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)	-
N	Nombre de conducteurs d'une phase de la machine	-
Φ	Flux maximum à travers un enroulement	Wb
n_s	Vitesse de rotation	tr/mn
$K' = KNp$	Constante globale (caractéristique de la machine)	-
e_g	f.é.m. à vide	V
V_g	tension aux bornes d'un enroulement de la machine	V
R_g	résistance de l'enroulement	Ω
L_g	inductance synchrone	H
J_{ds}	Inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone	N.m
Ω_s	Vitesse de rotation	tr/mn
T_d	Couple mécanique sur l'arbre	N.m
T_{em_g}	Couple électromagnétique	N.m
P_c	Puissance de la conception prévue	W
P_M	Puissance pointe max atteinte	W
k_g	Coefficient d'évolution de charge	%
k_c	Marge de conception	%
E_c	Energie de la conception prévue	Wh
E_M	Energie totale produite	Wh
N_e	Nombre d'heures équivalent	h/j
E_{sol}	Gisement solaire	Wh/(m ² j)
E_{elec}	Demande énergétique journalière	Wh/j
N_e	Nombre d'heure	h/j
P_c	Puissance crête	W _c
$P_{c\text{finale}}$	Puissance crête finale en tenant compte des pertes	W _c
C_p	Efficacité de l'onduleur	%
C_{cond}	Coefficient associé aux pertes de courant de sources variées	-
C_f	Facteur de charge prévisible	-
E	Energie brute produite	Wh
C_L	Coefficient de pertes	%
λ_a	Coefficient de pertes par effet de sillage	%

λ_b	Coefficient des pertes pour causes d'arrêts	%
λ_m	Coefficient représentant les pertes divers	%
C_{AH}	Capacité des batteries	Ah
N_{ja}	Nombre de jours d'autonomie nécessaires	jour
B_j	Besoin journalier	Ah/jour
C_{nom}	Capacité nominale	Ah
P_d	Profondeur de décharge maximale autorisée	-
R_t	Coefficient réducteur tant compte de la température	-
P_{conv}	Puissance nominal du convertisseur	W
k_{conv}	Coefficient pour dimensionnement du convertisseur égal	-
P_{bmax}	Puissance instantané maximale fournie par le banc de batteries.	W
r_i	Facteur d'annuité pour la composante i	-
N_i	Durée de vie de la composante i	W
M_i	Fraction d'investissement pour l'entretien (maintenance)	\$
I_i	Investissement et installation pour la composante i	\$
P_i	Puissances du système proposé	W
E_j	Consommation journalière d'électricité en	Wh
a	Taux d'actualisation	-
Pr_{fuel}	Prix unitaire du combustible	\$/kg
T_{CO_2}	Masse de CO2 produite pour une unité de masse de combustible	-
T_x	Taxe sur les émissions de CO2	\$/t
η_{GE}	Rendement du groupe électrogène	%
PCI	Pouvoir calorifique minimum	kWh/kg
K_{PF}	Coefficient de performance	-

2. Abréviation

PV-E-D	Photovoltaïque-éolien-diesel
EnR	Energies Renouvelables
DC	Courant Continue
AC	Courant Alternatif
PV	Photovoltaïque
AM ₀	Masse d'air
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GD	Générateur diesel
MPPT	Maximum Power Point Tracker
GSAP	Génératrice synchrone a aimant permanent
PI	Proportionnelle intégrale
DOD	Profondeur de la charge
SOC	Etat de charge
PID	Proportionnelle intégrale dérivé
HTB	Haute tension électrique >50kV~
Sonelgaz	Société algérienne de production d'électricité
SPE	Société algérienne de production d'électricité
SKTM	Société d'électricité et des énergies renouvelables
HOMER	Logiciel de dimensionnement et d'optimisation des systèmes hybrides

***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***

Introduction Générale

Avec l'explosion démographique planétaire et le développement industriel, la demande en ressources énergétiques ne cesse d'augmenter. Les ressources énergétiques fossiles, qui dominent la consommation énergétique mondiale, ont connu une croissance significative de 11% entre 1970 et 2000 et devraient augmenter de 30 à 40% d'ici 2030.

L'électricité est la forme d'énergie la plus facile à exploiter aujourd'hui, mais elle doit d'abord être produite, généralement dans des unités de production à grande puissance, puis transportée par un réseau avant d'être distribuée à chaque consommateur. Toutefois, pour les sites isolés ou éloignés du réseau, ils sont alimentés à travers des minicentrales de production généralement constituée de groupes diesel et d'un réseau de distribution local sans réseau de transport.

Les sources d'énergie renouvelables ont suscité un regain d'intérêt ces dernières années. La principale raison de cet essor réside dans les prévisions d'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la planète, telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et même l'uranium. En revanche, les sources d'énergie renouvelables peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine, car elles utilisent des flux énergétiques naturels provenant du soleil ou de la biomasse. Une autre raison du développement des sources d'énergie renouvelables est la distribution inégale des ressources énergétiques conventionnelles sur la planète, associée à une consommation inégale également. Ainsi, une partie importante de l'humanité n'a pas accès à l'électricité (environ 22% ou 1,5 milliards de personnes), ce qui limite son développement. Les besoins électriques de ces personnes peuvent être satisfaits grâce à une production d'énergie distribuée assurée par des systèmes à énergie renouvelable. Enfin, la lutte contre les émissions polluantes, qui sont à l'origine de nombreux phénomènes néfastes tels que l'effet de serre, le trou dans la couche d'ozone stratosphérique et le réchauffement global, est une raison importante pour développer les énergies renouvelables. Ces gaz nocifs sont émis par diverses activités humaines, notamment la production d'électricité à partir de sources d'énergie conventionnelles. Ainsi, la réduction de la production d'électricité à partir de sources classiques en augmentant la part des énergies renouvelables permettra de réduire les émissions et leurs conséquences.

L'augmentation de la part des énergies renouvelables pour répondre aux besoins des consommateurs est régie par le "Protocole de Kyoto", qui impose des exigences concrètes aux pays signataires. Malgré l'opposition de nombreux pays, ce document fournit la base pour le développement futur des sources d'énergie renouvelable.

Le premier chapitre de ce mémoire commence par une présentation de la définition et de la mission du système multi-sources. Nous nous penchons sur la définition et l'énoncé de mission de ces systèmes, avant de passer à un examen de leur état actuel de progression qui est le sujet principal de cette étude. Différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables en site isolé sont également présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre expose la modélisation de l'ensemble des composants du système multi-

sources dans le but d'analyser la dynamique du comportement global du système face aux variations climatiques et de charge en régime de charge équilibrée. Les modèles de simulation sont élaborés sous l'environnement MATLAB/Simulink.

CHAPITRE I

*Etat de l'art sur le système
d'énergie multi-source PV-E-D*

I.1 Introduction

La puissance variable et imprévisible produite par les sources d'énergie renouvelables peut être résolue grâce à l'utilisation d'un système hybride qui couplerait plusieurs sources d'approvisionnement différentes.

Cette méthode permettrait d'atténuer les effets aléatoires d'un gisement d'énergie renouvelable en multipliant les sources de nature distincte pour former un système multi-sources. Les systèmes multi-sources d'énergie sont des solutions très attrayantes pour les systèmes de production d'énergie de petite et moyenne puissance, car ils ont peu d'impact sur l'environnement et ont une efficacité énergétique élevée. Bien que ces solutions soient plus complexes que les solutions courantes mono-source, elles présentent des avantages significatifs tels que leur flexibilité, leur souplesse de fonctionnement et leur coût attractif.

I.1 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie possède un potentiel important en énergies renouvelables, en particulier en énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique.

Le gouvernement a mis en place des politiques et des mesures incitatives pour encourager l'investissement dans les énergies renouvelables, et a fixé des objectifs ambitieux pour augmenter la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité du pays.

Le programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique prévoit la mise en place d'une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030, dont 12000 MW seront destinés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation. Le potentiel solaire étant le plus important, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Le programme inclut la réalisation d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques voire Tableau I-1

Application	Puissance installée (kW)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	2%
Autres	166	7%

Tableau I-1 : Répartition de la puissance installée par application en Algérie. [4]

Le potentiel solaire de l'Algérie est l'un des plus élevés au monde, avec une irradiation solaire annuelle moyenne de 2 000 kWh/m². Ce potentiel est particulièrement important dans les régions du sud de l'Algérie.

- ◆ Le potentiel éolien de l'Algérie est également important, avec une vitesse moyenne du vent de 6,5 à 7,5 m/s dans les zones côtières.
- ◆ L'Algérie possède également un potentiel géothermique, principalement dans les régions du sud du pays.
- ◆ En 2019, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en Algérie était de 1,3%.
- ◆ Le Plan National des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (PNRE) vise à atteindre une capacité installée de 22 GW en énergies renouvelables d'ici 2030, dont 13,5 GW en solaire, 5,1 GW en éolien, 2 GW en hydraulique, 1 GW en biomasse et 0,4 GW en géothermie.
- ◆ Le gouvernement algérien a mis en place un certain nombre de mesures pour encourager l'investissement dans les énergies renouvelables, telles que des tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir de sources renouvelables et des exonérations fiscales pour les entreprises qui investissent dans ces technologies.
- ◆ Des projets de grande envergure ont été lancés, notamment la construction de la plus grande centrale solaire d'Afrique, la centrale solaire de Tafouk1 d'une capacité de 4,05 GW, ainsi que plusieurs autres centrales solaires et éoliennes à travers le pays.
- ◆ L'Algérie prévoit également d'exporter de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables vers les pays voisins, tels que la Tunisie et la Libye.

I.2 Définition et mission des systèmes d'énergie multi-sources

Un système multi-sources est donc une installation qui combine différentes sources d'énergie, conventionnelles et renouvelables, pour produire de l'électricité de manière continue tout en maximisant l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable ont une production d'énergie variable, donc leur association avec des sources conventionnelles permet d'assurer une production d'électricité constante.

Il existe de nombreuses topologies de convertisseurs qui peuvent être utilisées pour les systèmes multi-sources. Le choix dépendra des besoins spécifiques du système, de la puissance requise, des sources d'énergie disponibles et de la stratégie de fonctionnement choisie. Les performances d'un système multi-sources dépendent de nombreux facteurs, tels que le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture et la stratégie de fonctionnement. Certains paramètres permettant d'évaluer ses performances incluent l'économie de combustible, le coût du kilowattheure, le nombre et la durée des pannes, le

nombre d'arrêts pour l'entretien, entre autres.

Les systèmes multi-sources ont une grande variété d'applications possibles et peuvent être utilisés dans différents domaines tels que les zones rurales, les sites isolés, les communautés éloignées, les entreprises, les centres de recherche, les bâtiments publics, etc. Les seuils de puissance donnés dans le tableau I-1 sont des ordres de grandeur et permettent de donner une idée de la puissance des systèmes multi-sources en fonction de leur gamme d'application. Un système multi-sources est donc une installation qui combine différentes sources d'énergie, conventionnelles et renouvelables, pour produire de l'électricité de manière continue tout en maximisant l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable ont une production d'énergie variable, donc leur association avec des sources conventionnelles permet d'assurer une production d'électricité constante.

Il existe de nombreuses topologies de convertisseurs qui peuvent être utilisées pour les systèmes multi-sources. Le choix dépendra des besoins spécifiques du système, de la puissance requise, des sources d'énergie disponibles et de la stratégie de fonctionnement choisie. Les performances d'un système multi-sources dépendent de nombreux facteurs, tels que le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture et la stratégie de fonctionnement. Certains paramètres permettant d'évaluer ses performances incluent l'économie de combustible, le coût du kilowattheure, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien, entre autres.

Les systèmes multi-sources ont une grande variété d'applications possibles et peuvent être utilisés dans différents domaines tels que les zones rurales, les sites isolés, les communautés éloignées, les entreprises, les centres de recherche, les bâtiments publics, etc. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau I-2). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs. [6]

Puissance du système multi-sources [kW]	Application
Faible : < 5	Systèmes autonome : stations de télécommunications, pompage de l'eau, autre application isolés
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Tableau I-2 : Classification des systèmes multi-sources par gamme de puissance. [6]
On peut classer les installations de systèmes multi-sources en site isolé selon leur degré de pénétration de l'énergie renouvelable, qui correspond à la proportion d'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à la puissance totale demandée par la charge. Cette classification est applicable aux grandes installations. [6]

I.3 Présentation du système hybride choisie

Le système étudié dans ce mémoire est un système multi-sources éolien photovoltaïque diesel Figure I-1. Il est composé de générateurs diesel, d'une ferme éolienne, d'un champ photovoltaïque, d'un système de stockage, de convertisseurs, de charges, de charges de délestage et d'une option de gestion des charges ou d'un système de supervision (Figure I-1). Les différentes composantes peuvent être connectées en diverses architectures. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques sont constitués de deux bus : un bus en courant continu pour les sources, les charges à courant continu et les batteries, et un bus en courant alternatif pour les générateurs en courant alternatif et le système de distribution.

I.4 Principaux éléments d'un système PV-E-D

Les systèmes multi-sources d'énergie combinent des sources conventionnelles (groupe diesel) et renouvelables (éolien, solaire, hydroélectrique, géothermique, marémotrice, etc.) avec des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batteries, volants d'inertie, stockage hydrogène, etc.), des charges principales et de délestage, ainsi qu'un système de surveillance pour fournir une alimentation électrique fiable et durable.



Ferme Eolienne



Champ photovoltaïque



Groupes Diesel



Banc de batteries



Convertisseurs



Charge alternative

Figure I-1 : Principaux éléments d'un système PV-E-D

I.5.1 L'installation photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est une méthode permettant de convertir directement l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu, sans nécessiter de transformation intermédiaire. Techniquement, les systèmes de conversion d'énergie solaire ont un potentiel considérable pour répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale. Un système photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques, de régulateurs et de convertisseurs, tels que des onduleurs.

Cette conversion se fait au moyen de cellules photovoltaïques (PV), qui transforment le rayonnement solaire en électricité. Contrairement à ce que pourrait suggérer son nom, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique, ni sous toute autre forme. La cellule photovoltaïque est un convertisseur instantané qui ne peut fournir de l'énergie électrique que lorsqu'elle est exposée à un rayonnement. Dans l'obscurité totale, elle se comporte comme un composant passif. Elle est unique en son genre, car elle ne peut être comparée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Ses caractéristiques sont non linéaires et dépendent de l'éclairement qu'elle reçoit.

Un système photovoltaïque est constitué des éléments suivants:

- I Module photovoltaïque
- II Régulateur
- III Convertisseur (onduleur).

III.5.1.1 Cellule photovoltaïque

Les cellules PV sont des éléments fondamentaux des installations photovoltaïques. Elles sont fabriquées à partir de semi-conducteurs et convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches minces de semi-conducteurs, telles que le silicium. Sa structure est similaire à celle d'une diode classique (voir Figure I-2).

La couche supérieure est dopée N tandis que la couche inférieure est dopée P, créant une jonction PN. Cette jonction PN génère une barrière de potentiel qui, lorsqu'elle est exposée à la lumière, libère des électrons des atomes de la matière, créant ainsi des trous et des électrons. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N, générant ainsi un courant électrique et une différence de potentiel.

Les paramètres tels que le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de différents facteurs, qui seront expliqués dans la suite de l'exposé. Actuellement, les cellules les plus couramment utilisées sont celles à base de silicium, qui présentent une différence de potentiel d'environ 0,6 V

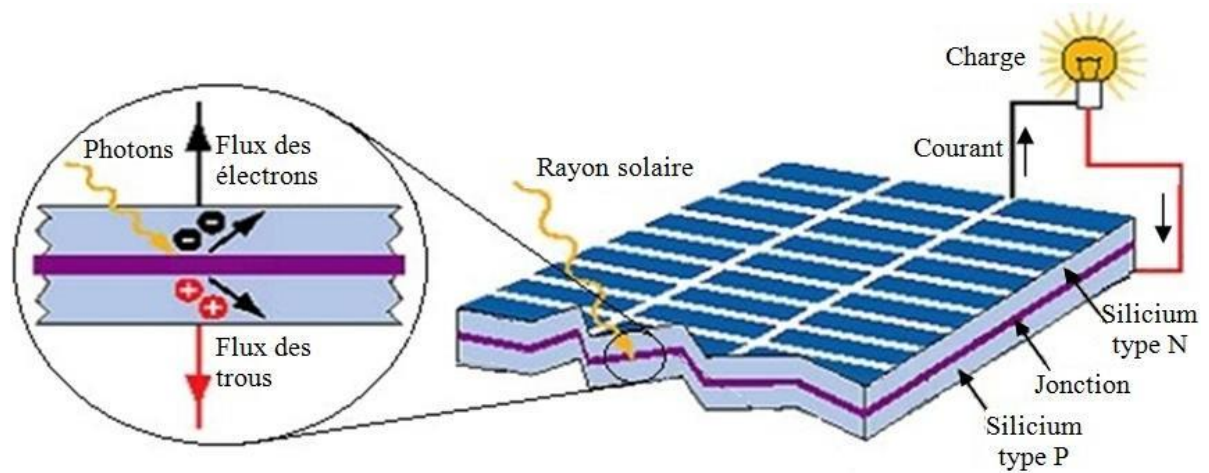


Figure I-2 : L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire [9]

Les cellules photovoltaïques sont regroupées en trois types distincts. Bien que les trois technologies soient en concurrence, le premier type est le plus largement utilisé sur le marché de la production, représentant 89,6 % de la production totale.

Le premier type de cellule photovoltaïque est le monocristallin, qui couvre une grande surface, présente une haute qualité et nécessite une seule procédure de jonction. Elle produit une grande quantité d'énergie.

Le deuxième type de cellule est le polycristallin, développé pour répondre au besoin de réduire les coûts de production des cellules photovoltaïques, car les techniques industrielles utilisées nécessitent moins d'énergie.

Le troisième type est l'amorphe, qui vise à améliorer les performances médiocres du deuxième type (technologie du film mince) tout en maintenant un coût de production très faible. Les recherches actuelles visent à atteindre une efficacité de 30 à 60 % tout en maintenant des coûts bas de matériaux et de fabrication voire Figure I-3 les Différents types de cellules photovoltaïques

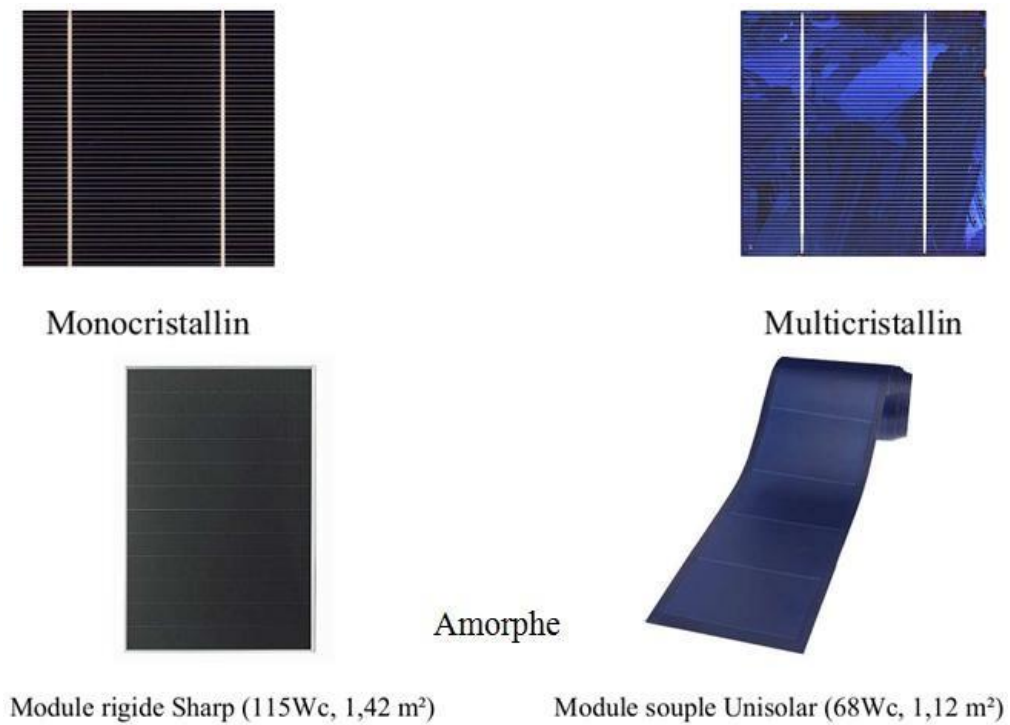


Figure I-3 : Différents types de cellules photovoltaïques [10]

Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparaître des écarts importants qui sont décrits dans le Tableau I-3 suivant :

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement maximum obtenu au laboratoire (%)
Monocristallin	12-15	24
Multicristallin	11-14	18,6
Couche mince : Amorphe	6-7	12,7

Tableau I-3. Rendement des modules en fonction des différentes technologies [8]

III.5.1.2 Caractéristique électrique

Le comportement d'une cellule photovoltaïque peut être modélisé par un circuit électrique équivalent voire Figure I-4, comprenant une source de courant en parallèle avec une diode et une résistance série R_s et une résistance shunt R_p en parallèle. La diode représente la jonction PN de la cellule photovoltaïque, qui laisse passer le courant électrique dans un seul sens. La source de courant représente la production

d'électricité par la cellule, qui est proportionnelle au niveau d'éclairage. La résistance série et la résistance shunt représentent les pertes d'énergie dans la cellule due aux caractéristiques des matériaux et aux connexions électriques.

la tension en circuit ouvert (V_{co}) comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé correspond à la tension maximale que peut fournir une cellule PV lorsqu'elle n'est pas connectée à un circuit extérieur, c'est-à-dire lorsque son courant est nul. Cette tension dépend de plusieurs facteurs tels que le matériau utilisé, la température et l'état de vieillissement de la cellule. Son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'éclairage et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin)

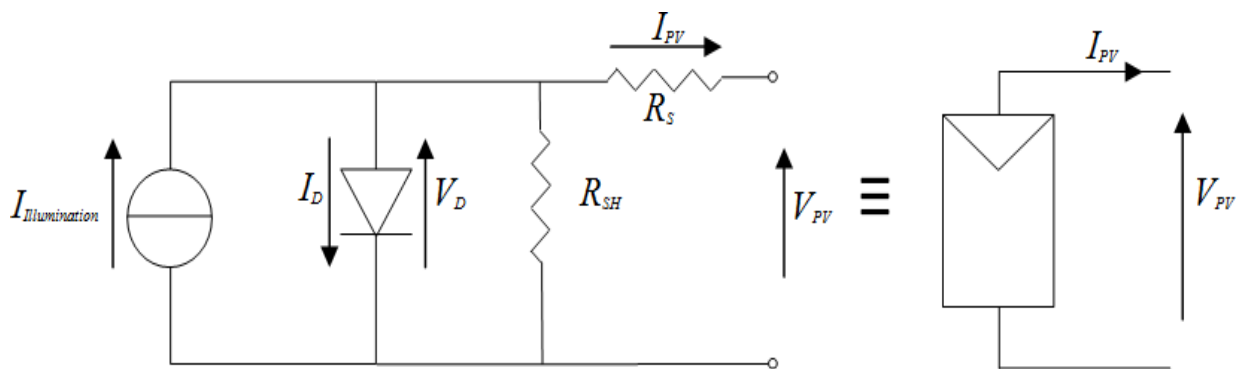


Figure I-4 : circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [11]

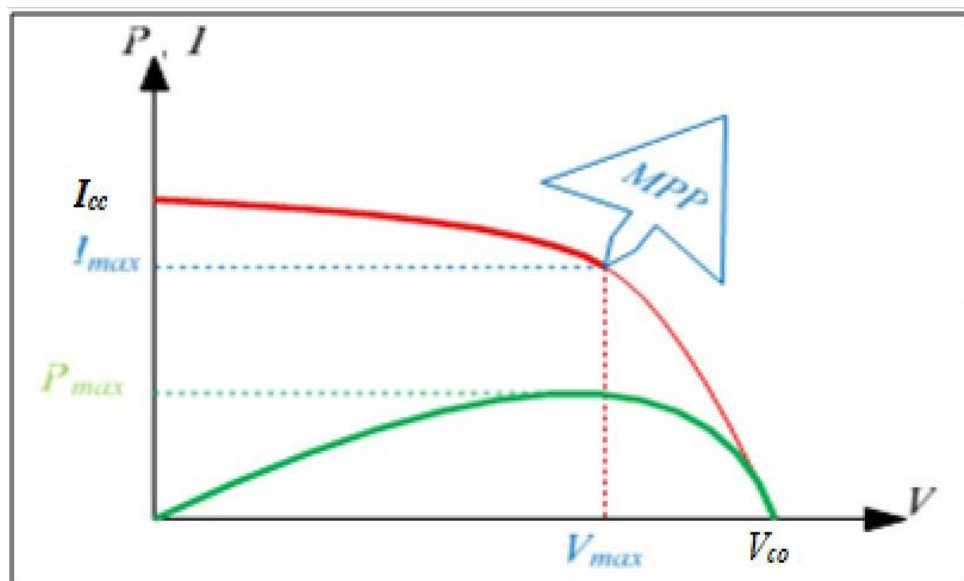


Figure I-5 : Caractéristique typique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque [12]

III.5.1.3 Le module photovoltaïque :

Les connexions entre les cellules solaires d'un générateur photovoltaïque peuvent être réalisées en parallèle ou en série, ou en une combinaison de ces deux modes de connexion.

Dans une connexion en parallèle, les bornes positives (+) de toutes les cellules sont connectées ensemble et les bornes négatives (-) sont également connectées ensemble. Cette configuration permet d'augmenter le courant de sortie du générateur, mais la tension de sortie reste celle d'une seule cellule.

Dans une connexion en série, les bornes positives (+) d'une cellule sont connectées aux bornes négatives (-) de la cellule suivante. Cette configuration permet d'augmenter la tension de sortie du générateur, mais le courant reste celui d'une seule cellule.

La combinaison de ces deux modes de connexion permet d'obtenir une tension et un courant de sortie plus élevés, adaptés aux besoins de l'application à laquelle le générateur est destiné.

III.5.1.3.1 Regroupement des cellules en séries :

L'équation (I.1) est la suivante:

$$V_{gpv} = N_s \times V_{cell} - N_s \times I_{sc} \times R_s - I_{pv} \times R_p$$

où:

- V_{gpv} : est la tension de sortie du générateur photovoltaïque en série.
- N_s : est le nombre de cellules en série.
- V_{cell} : est la tension en circuit ouvert d'une cellule.
- I_{sc} : est le courant de court-circuit d'une cellule.
- R_s : est la résistance série équivalente d'une cellule.
- I_{pv} : est le courant de photo-courant fourni par le générateur.
- R_p : est la résistance parallèle équivalente du générateur.

L'équation montre que la tension de sortie du générateur photovoltaïque en série est directement proportionnelle au nombre de cellules en série et à la tension en circuit ouvert d'une cellule. Cependant, la résistance série équivalente des cellules en série et la résistance parallèle équivalente du générateur peuvent réduire la tension de sortie du générateur. Il est donc important de minimiser ces résistances pour maximiser la puissance de sortie du générateur photovoltaïque voire Figure I-6

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co} ; I_{ccN_s} = I_{cc} \tag{I.1}$$

V_{coN_s} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccN_s} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce [8].

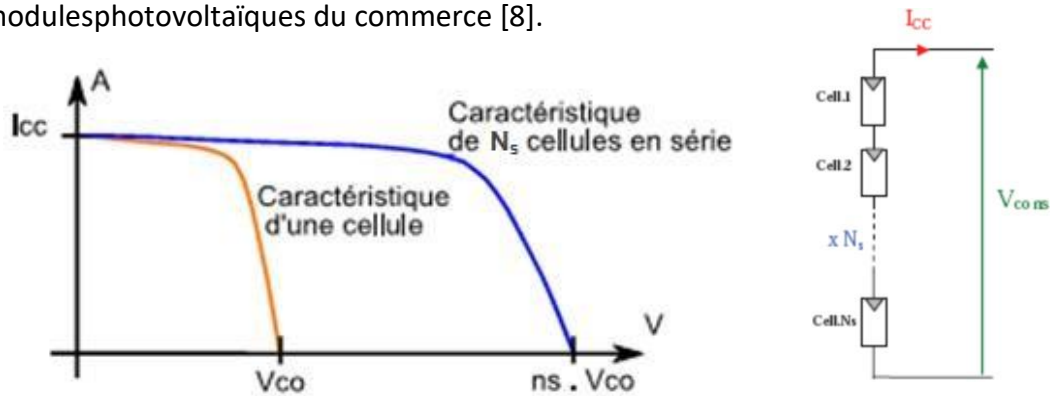


Figure I-6 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série [10]

III.5.1.3.2 Regroupement des cellules en parallèle :

Une association parallèle Figure I-7 de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (I.2) et la Figure I-7 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [10].

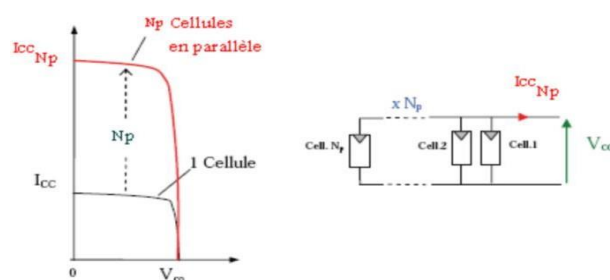


Figure I-7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle [13]

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc} ; V_{coN_p} = V_{co} \tag{I.2}$$

Avec :

I_{ccN_p} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

V_{coN_p} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

III.5.1.3.3 Regroupement des cellules série et parallèle

La caractéristique ($I-V$) d'un générateur photovoltaïque peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s \times N_p$) cellules en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. Pour remédier le phénomène point chaud générer lors de la défectuosité d'une des cellules ce qui provoquer une forte diminution du courant, on équipe les panneaux photovoltaïques de diodes by-pass qui ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives. Figure I-8.

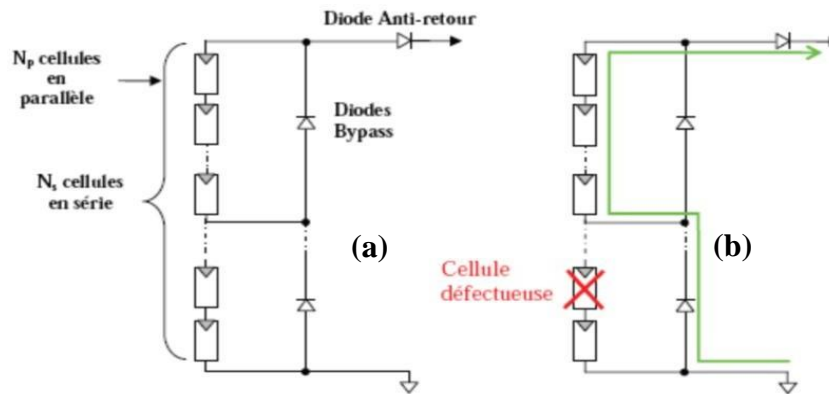


Figure I-8 : (a) Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protections.

III.5.1.4 Le gisement solaire :

L'énergie solaire est produite par des réactions de fusion thermonucléaire qui ont lieu dans le cœur du Soleil. Cette énergie est ensuite émise sous forme de rayonnement électromagnétique dans toutes les directions. Une partie de ce rayonnement atteint la Terre et fournit l'énergie nécessaire à la vie sur notre planète.

La surface du Soleil se comporte en effet comme un corps noir à une température d'environ 5800K°. Le spectre d'émission du Soleil est donc continu et dépend de sa température. Le spectre réel du rayonnement solaire hors atmosphère est donné par la courbe b de la figure I-9, qui montre une distribution relativement uniforme d'énergie sur l'ensemble des longueurs d'onde. Cependant, l'atmosphère terrestre agit comme un filtre qui absorbe ou diffuse une partie du rayonnement solaire, ce qui modifie le spectre du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre. Le spectre au sol, modifié par l'atmosphère terrestre, est représenté par la courbe c de la figure I-9.

Il est intéressant de noter que la plupart de l'énergie solaire est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à $2,5\mu\text{m}$, notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre $0,4$ et $0,78\mu\text{m}$. C'est pourquoi les cellules solaires sont conçues pour convertir principalement cette partie du spectre solaire en électricité.

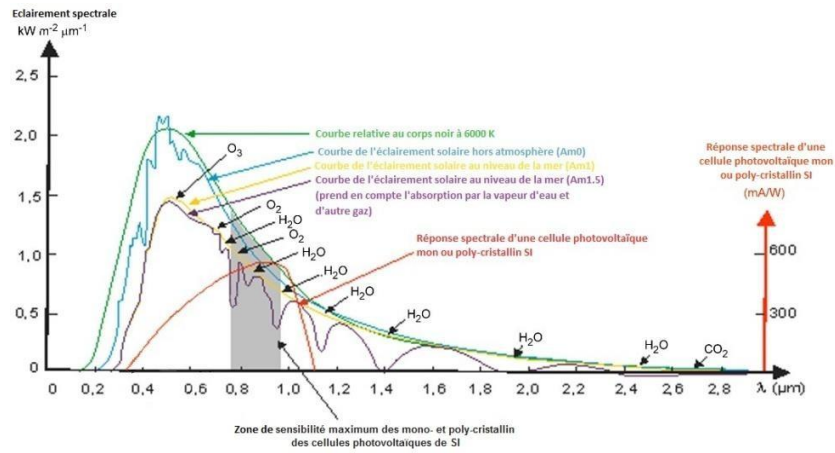


Figure I-9 : Spectres solaires [14]

En résumé, l'éclairement moyen reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre est de 1366 W/m^2 . Cependant, une partie de ce rayonnement est diffusée et absorbée par les molécules gazeuses, les aérosols, les poussières et les nuages dans l'atmosphère. Seulement 48% du rayonnement incident parvient au sol, se composant d'un rayonnement direct (30%) et d'un rayonnement diffus (18%). Sur l'ensemble du rayonnement global, 90% est absorbé par le sol et 10% est renvoyé vers l'espace. L'éclairement solaire reçu par une surface terrestre dépend donc des conditions atmosphériques et de l'heure de la journée, ainsi que de la latitude et de la saison.

III.5.1.4.1 Mouvements de la Terre :

La figure I.10 représente une vue schématique de la Terre tournant autour du Soleil et tournant également sur elle-même autour de son axe des pôles. La Terre suit une orbite elliptique autour du Soleil, avec le Soleil situé près du foyer de l'ellipse. La distance entre la Terre et le Soleil varie au cours de l'année en raison de l'excentricité de l'orbite. L'axe des pôles de la Terre est incliné de $23^{\circ}27'$ par rapport à l'écliptique, ce qui provoque les saisons et les changements climatiques.

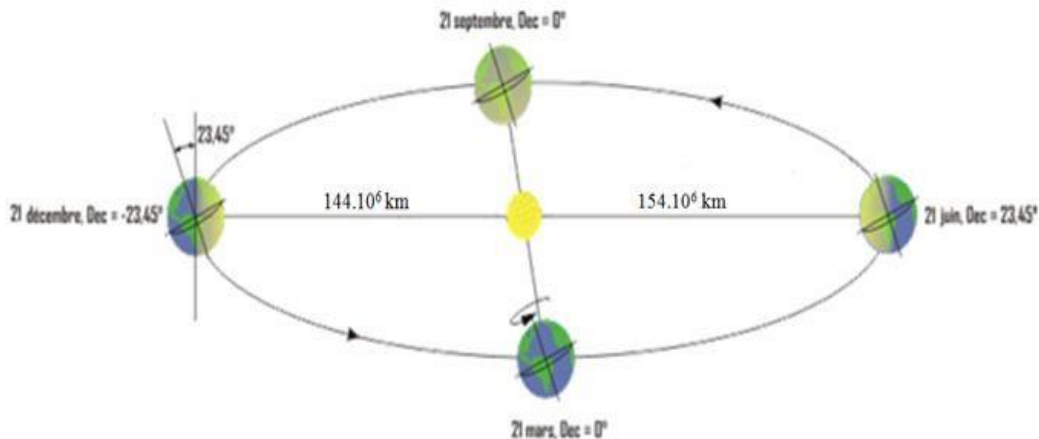


Figure I-10 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

L'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'écliptique est également responsable des différences d'ensoleillement entre les différentes régions de la Terre au cours de l'année. On appelle déclinaison (w) l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La relation pour calculer la déclinaison w en fonction de la date j dans l'année est :

$$w = -23,45^\circ * \cos(360*(j + 10)/365)$$

où j représente le jour de l'année, avec $j = 1$ pour le 1er janvier, $j = 2$ pour le 2 janvier, et ainsi de suite jusqu'à $j = 365$ pour le 31 décembre (ou $j = 366$ pour une année bissextile). La valeur cosinus est en degrés. Où j est le numéro du jour de l'année. Voir Figure I-11

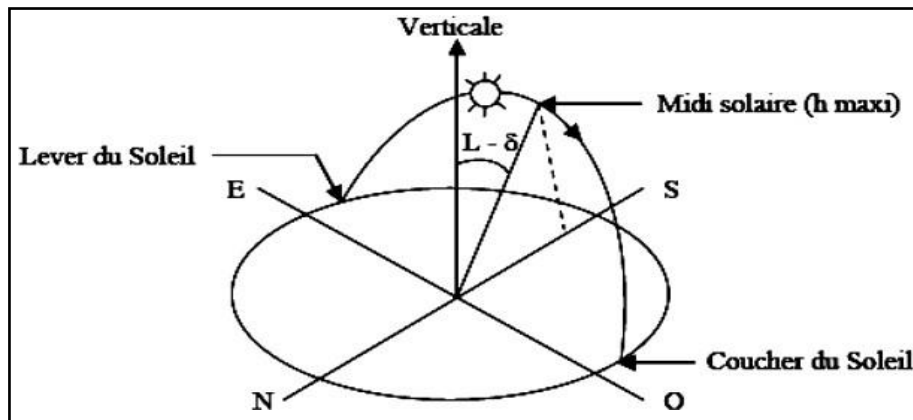


Figure I-11 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude

III.5.1.4.2 Mouvement apparent du Soleil :

la durée du jour varie au cours de l'année en fonction de la latitude du lieu d'observation et de la position du Soleil par rapport à l'équateur. Aux équinoxes, la déclinaison du Soleil est nulle, ce qui signifie que sa position est sur l'équateur céleste. Ainsi, pour un observateur situé à une latitude L , l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $L - 0 = L$. À midi solaire, le Soleil se trouve donc au zénith pour un observateur situé à la latitude L .

En revanche, aux solstices, la déclinaison du Soleil est maximale, soit $\pm 23,45^\circ$. Pour un observateur situé à une latitude L , l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est alors égal à $L - (\pm 23,45^\circ)$. Ainsi, en été pour un observateur situé à une latitude L de l'hémisphère nord, le Soleil se trouve plus près de la verticale, ce qui fait que la durée du jour est plus longue qu'aux équinoxes. À l'inverse, en hiver pour un observateur situé à une latitude L de l'hémisphère nord, le Soleil se trouve plus loin de la verticale, ce qui fait que la durée du jour est plus courte qu'aux équinoxes.

La latitude (L) et la date jours (j) servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure (TS) donne la position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire (TS) en fixant ($TS = 12h00$) lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »). On définit également l'angle horaire (δ) par [8]:

$$\delta = 15^\circ \cdot (TS - 12) \quad (1.4)$$

δ : est compté positivement l'après-midi.

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(\delta) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \quad (1.5)$$

Et l'azimut α par la relation :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\sin(\delta)} \quad (1.6)$$

III.5.1.4.3 Repérage de la position du Soleil

Désigné par la lettre S sur la figure I-12, le rayonnement direct est la portion du rayonnement solaire qui parvient à la surface de la terre sans interruption. Cette composante verticale du rayonnement est appelée rayonnement direct.

L'éclairement global sur une surface plane d'inclinaison i et d'orientation γ par rapport à la direction du sud est donné par :

$$G(i,\gamma) = S \cos(\theta) + D \quad (1.7)$$

où θ est l'angle zénithal, c'est-à-dire l'angle entre la direction du soleil et la normale à la surface, et $\cos(\theta)$ est le cosinus de cet angle qui dépend de la latitude L , de la déclinaison du soleil δ et de l'heure solaire locale t .

Pour une surface horizontale, l'éclairement global est simplement la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus :

$$G = S + D$$

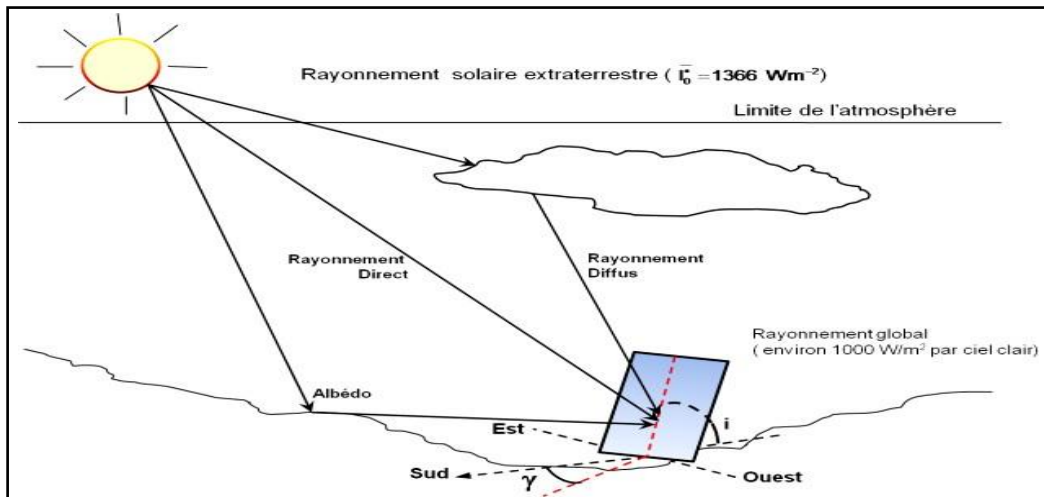


Figure I-12 : Composantes du rayonnement solaire au sol

$$S^* = I^* [\cos(h)\sin(i)\cos(a - \gamma) + \sin(h)\cos(i)] \quad (I.8)$$

avec I^* le rayonnement direct au sol :

$$I_0^* = I_0 \cdot \exp[-0.9m_h + 9.4] \quad (I.9)$$

D^* est le rayonnement diffus reçu par le plan d'inclinaison i :

avec:

$$D^* \cdot i = \frac{1 + \cos i}{2} D^* + 1 - \frac{\cos i}{2} G^* \quad (I.10)$$

- a_1 est l'albédo qui correspond à la fraction de l'énergie du rayonnement solaire reçu par une surface en provenance de l'atmosphère qui est diffusée vers celle-ci ;
- D^* est le rayonnement diffus atmosphérique sur un plan horizontal la relation suivante permet d'évaluer l'intensité du rayonnement diffusé par le ciel vers le sol, elle tient compte du facteur de trouble atmosphérique T_L

$$G_0^* = (1270 - 56T)(\sinh) \frac{1T_L + 36}{33} \quad (I.11)$$

- G^* est le rayonnement global sur un plan horizontal :

$$G_0^* = \underline{0}(\sin h)^2 [T - 0.5 - (\sin h)^2] \quad (I.12)$$

I.5.2 L'installation éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Figure I-13), elles sont généralement utilisés pour produire de Cette conversion se fait en deux étapes [15] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

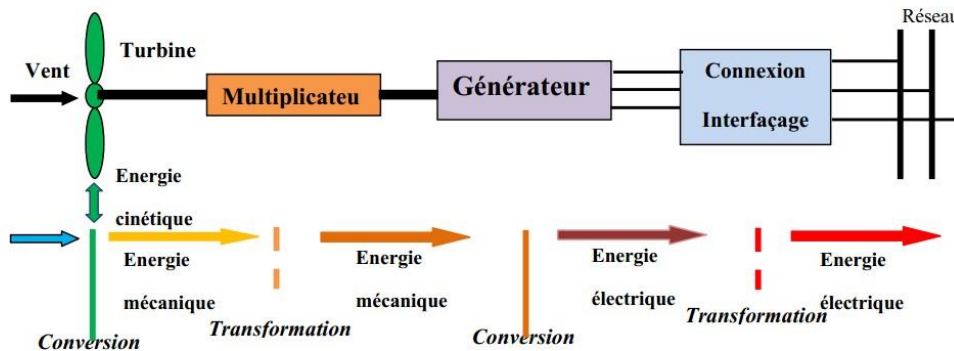


Figure I-13 : Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne

I.5.2.1 Principaux composants d'une Eolienne

Différentes configurations d'éoliennes existent, présentant des variations significatives. Cependant, une éolienne "classique" Figure I-14 est généralement composée des éléments suivants :

1. Le mât : fabriqué en tube d'acier ou éventuellement en treillis métallique, il doit être suffisamment haut pour éviter les perturbations près du sol. Le choix de sa taille est un compromis entre le coût de la matière et le poids, généralement légèrement supérieur au diamètre du rotor de l'éolienne.
2. La nacelle : regroupe les éléments mécaniques permettant de relier le rotor éolien au générateur électrique, tels que les arbres lent et rapide, les roulements et le multiplicateur. Elle comprend également un frein à disque distinct du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur, généralement une machine synchrone ou asynchrone, ainsi que les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la

nacelle (pour maintenir la surface balayée par l'éolienne perpendiculaire à la direction du vent) font également partie de la nacelle. Des systèmes de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et un système électronique de gestion de l'éolienne sont également inclus.

3. Le rotor : composé de pales assemblées dans un moyeu, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3 pour les éoliennes destinées à la production d'électricité. Le rotor tripale est le plus courant en raison de son bon équilibre entre coût, comportement vibratoire, pollution visuelle et bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent équipés d'un système d'orientation des pales pour permettre à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner près du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif électronique de puissance. Les rotors à vitesse variable sont généralement moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié ou supprimé, mais ils nécessitent une interface électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge. Les pales se distinguent principalement par leur géométrie, qui détermine les performances aérodynamiques, ainsi que par les matériaux utilisés, tels que les composites à base de fibre de verre ou de carbone, offrant légèreté et résistance mécanique.
4. Le multiplicateur : il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
5. Le système de refroidissement : il comprend généralement un ventilateur électrique pour refroidir la génératrice, ainsi qu'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
6. La génératrice électrique : élément clé de la conversion mécano-électrique, elle peut être une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné, avec une puissance électrique allant de quelques kilowatts à 10 mégawatts

- 1 : pales, 2 : moyeu rotor,
 3 : nacelle, 4 : cardan,
 5 : transmission,
 6 : multiplicateur de vitesse,
 7 : frein à disque,
 8 : accouplement,
 9 : génératrice,
 10 : radiateur de refroidissement,
 11 : centrale de mesures du vent,
 12 : contrôle,
 13 : centrale hydraulique,
 14 : mécanisme d'orientation face au vent,
 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque,
 16 : capot, 17 : mât.

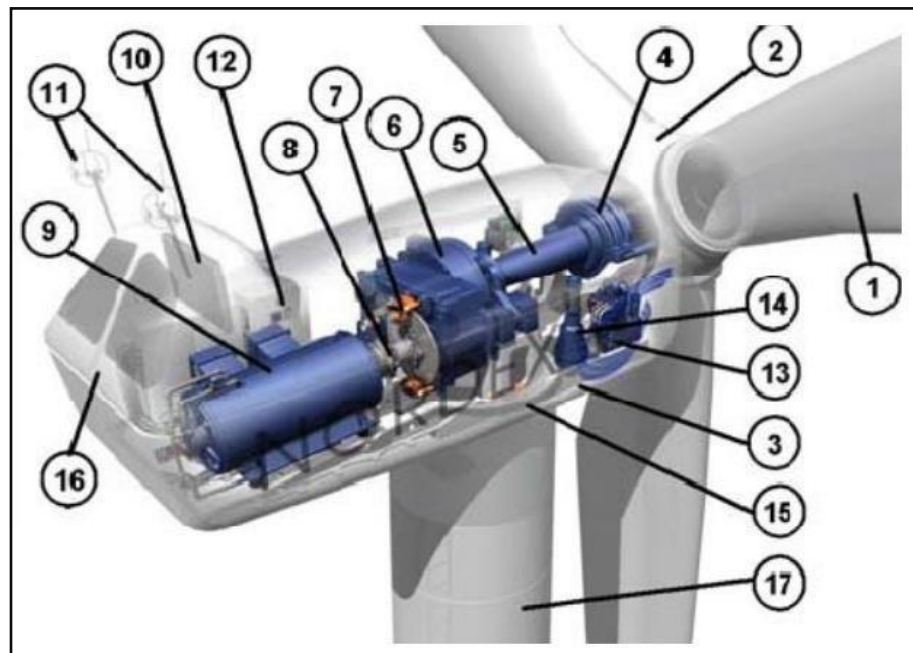


Figure I-14 : Composantes principales d'une Eolienne

I.5.2.2 Le gisement éolien :

La Figure I-15 présente la carte des vents de l'Algérie, indiquant les vitesses moyennes annuelles à une hauteur estimée de 10 mètres au-dessus du sol. Les vitesses obtenues varient de 2 à 6,5 m/s. On observe que, à l'exception de certaines régions côtières comme Bejaia et Oran, le Tassili et Béni Abbés, la vitesse moyenne du vent dépasse les 3 m/s [17]. Il est notable que le Sud de l'Algérie présente des vitesses plus élevées que le Nord, en particulier le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s, atteignant même plus de 6 m/s dans la région d'Adrar. En ce qui concerne le Nord, il est important de souligner que les vitesses moyennes sont généralement peu élevées. Cependant, les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, ainsi que les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter, ainsi que la région entre Bejaia au Nord et Biskra au Sud, offrent des perspectives intéressantes en termes de production éolienne si la hauteur des éoliennes choisies est élevée.

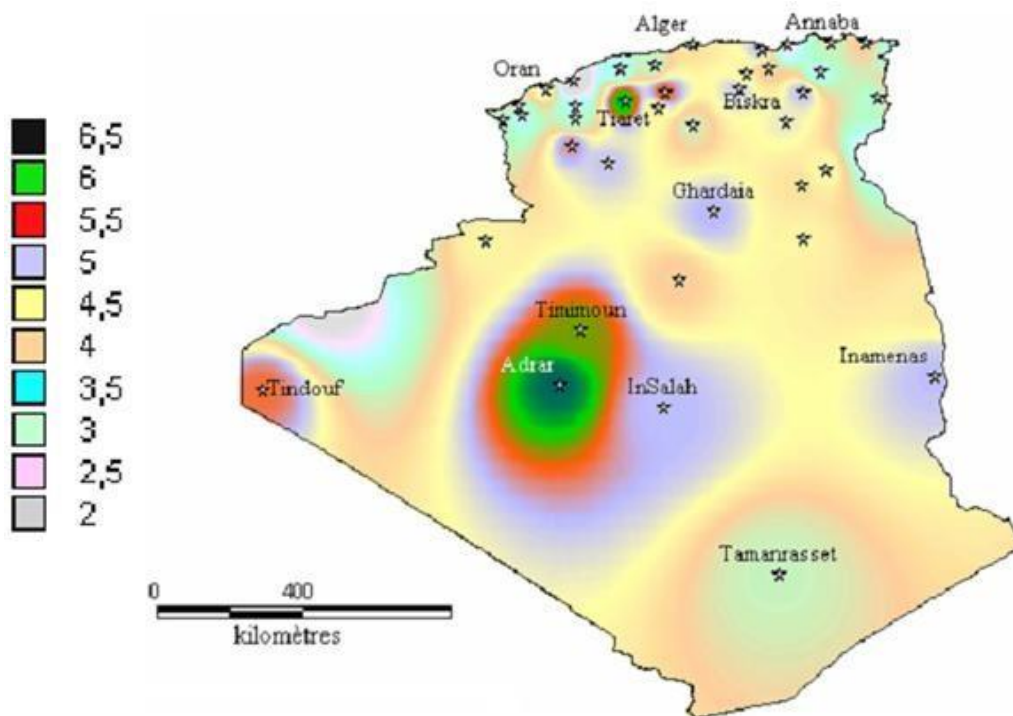


Figure I-15 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. [17]

I.5.2.3 Différents types des turbines éoliennes :

Une turbine éolienne est un dispositif propulsé par le vent. Depuis l'utilisation des premiers moulins à vent, la technologie des éoliennes n'a cessé de progresser. C'est au début des années 1940 que les premiers prototypes d'éoliennes équipées de pales profilées ont été utilisés avec succès pour produire de l'électricité. Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

I.5.2.3.1 Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures utilisées pour la production d'énergie électrique. Bien que plusieurs prototypes aient été développés, peu d'entre eux ont atteint le stade de l'industrialisation. Ces éoliennes sont généralement classées en deux catégories selon leur caractéristique aérodynamique : celles basées sur le principe de la portance (éoliennes à rotor de Darrieus, inventées par l'ingénieur français George Darrieus) et celles basées sur le principe de la traînée (éoliennes à rotor de Savonius, inventées par le Finlandais Sigurd Savonius en 1924). Voir Figure I-16

➤ Eoliennes à rotor de Darrieus

Ce type d'Eolienne est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Figure I-16). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. [16]

➤ Eoliennes à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure I-17).

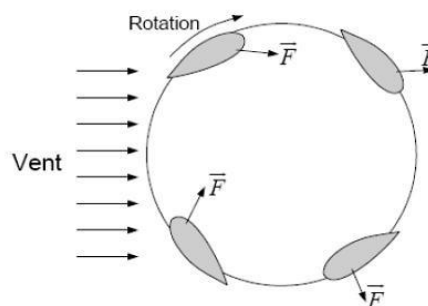


Figure I-16 : Eolienne à axe vertical (structure de Darrieus)

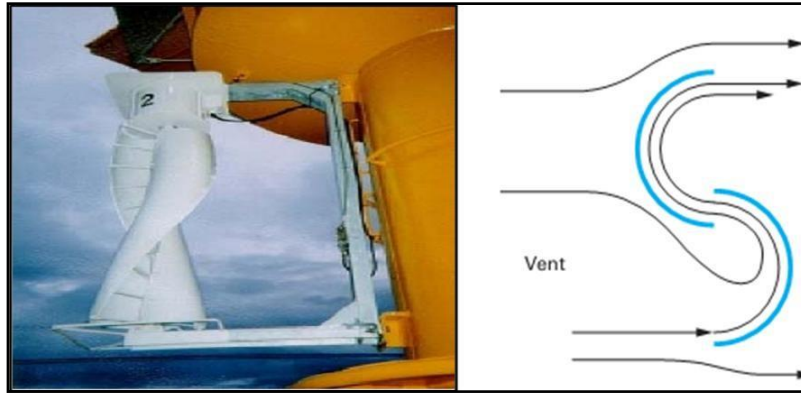


Figure I-17 Eolienne à axe vertical (structure de Savonius)

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont

les suivants :

- ❖ Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- ❖ La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction. Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:
 - Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
 - Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
 - Faible vitesse du vent à proximité du sol.

I.5.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal :

es turbines à axe horizontal (illustrées dans la Figure I-18) sont les plus largement utilisées de nos jours par rapport aux turbines à axe vertical, en raison de leur coût plus abordable et de leur exposition réduite aux contraintes mécaniques. Elles sont composées de plusieurs pales qui génèrent un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales varie de 1 à 3, et les turbines tripales sont les plus couramment utilisées, offrant un compromis optimal entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du dispositif éolien. [16]

Les turbines à axe horizontal sont généralement positionnées face au vent grâce à un mécanisme d'orientation asservi ou grâce à un équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine située du côté du vent.



Figure I-18 : Eoliennes à axe horizontal

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante dans un vent donné. La gamme des éoliennes disponible est très large, de 50 Watt (diamètre de 90 cm) à 5 MW et plus (+ de 124 m de diamètre voir la figure I-19). [19]

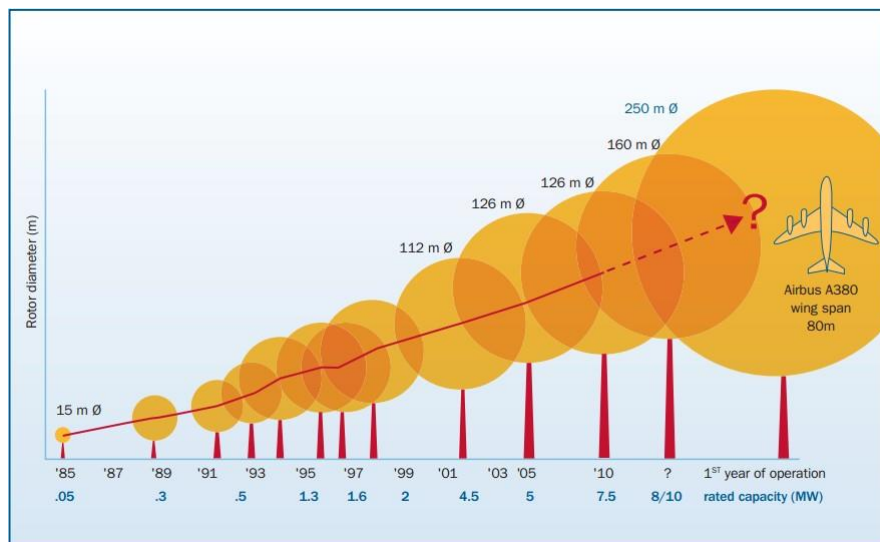


Figure I-19 : Taille des hélices en m et puissance en kW [20]

I.5.2.4 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

Considérons le système éolien à axe horizontal illustré dans la Figure I-20, où nous avons représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. [19]

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est équivalente à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après avoir traversé le rotor V_2 ,

Rotor soit la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pale

en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (I.13)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$D_m = 1 \frac{m(V_1 - V_2)}{2} \quad (I.14)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans

$$D_m = 1 \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1 - V_2)}{4} \quad (I.15)$$

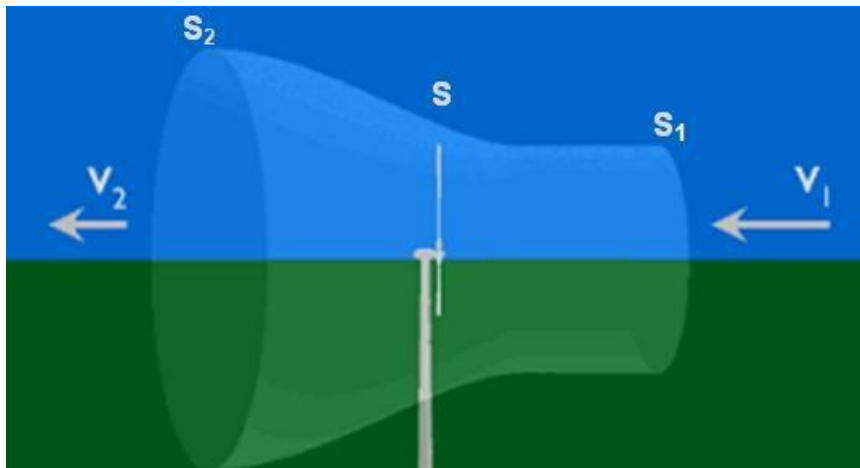


Figure I-20 : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (I.16)$$

ρ : Densité de l'air qui est égale à 1,22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C.
Selon la loi de *Betz*, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.
La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de *Betz* [19] :

$$P_{méc_max} = \frac{16}{27} \cdot P_{mt} = 0,59 \cdot P_{mt} \quad (I.17)$$

Sous cette forme, la formule de *Betz* montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors [15] :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (V_2))(1 - (V_2))}{2} \quad (I.18)$$

Lorsque nous représentons la caractéristique correspondante à l'équation mentionnée ci-dessus, nous observons que le rapport P_m/P_{mt} , également appelé coefficient de puissance C_p , atteint un maximum de 16/27, soit 0,59. Cette limite théorique est connue sous le nom de limite de *Betz* et elle définit la puissance maximale qui peut être extraite pour une vitesse de vent donnée. Cependant, il est important de noter que cette limite théorique n'est jamais atteinte en réalité, et chaque éolienne possède son propre coefficient de puissance défini en fonction de la vitesse relative λ , qui représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. Voir Figure I-21 coefficient de puissance

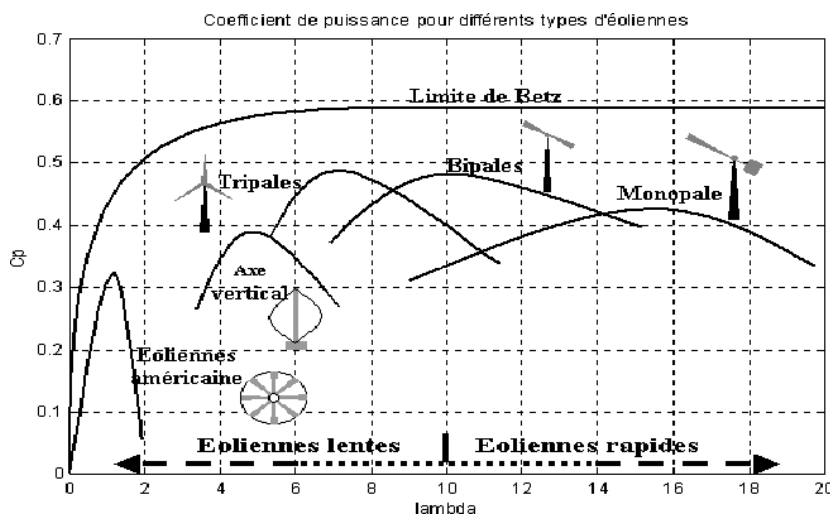


Figure I-21 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_P de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C^P = \frac{2P_{méc}}{\rho S V^3} \quad (I.19)$$

La puissance mécanique $P_{méc}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{méc} = \frac{1}{2} C_P \cdot \left(\frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I.20)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de rotation avant multiplicateur [rad/s] et R : rayon de l'éolienne

I.5.2.5 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne :

Une turbine éolienne est conçue pour produire une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Lorsque la vitesse du vent dépasse V_n , la turbine éolienne doit ajuster ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les contraintes mécaniques excessives sur les composants tels que les turbines, le mât et la structure, tout en maintenant une vitesse de rotation constante [21].

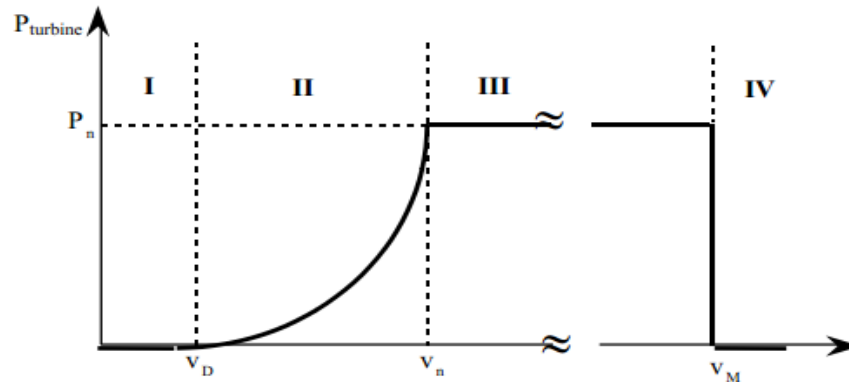
Cependant, contrairement à ce que l'équation (I-20) suggère, la puissance produite n'augmente pas indéfiniment avec la vitesse du vent dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la turbine éolienne répartissent la puissance sur différentes plages de vitesses du vent.

Dans ce contexte, les vitesses V_d (vitesse de démarrage), V_n (vitesse nominale) et V_m (vitesse d'arrêt) définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [21]:

- Zone 1: La puissance P est nulle (la turbine ne fonctionne pas).
- Zone 2: La puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_v .
- Zone 3: La vitesse de rotation est généralement maintenue constante par un dispositif de régulation, et la puissance $P_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale à P_n .
- Zone 4: Le système de sécurité arrête la rotation et le transfert d'énergie pour assurer le bon fonctionnement de la turbine

I.5.2.6 Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique s'effectue en deux étapes distinctes Figure I-22. Tout d'abord, au niveau de la turbine (rotor), une partie de l'énergie cinétique disponible dans le vent est extraite pour être convertie en énergie mécanique. Ensuite, au niveau de la génératrice, cette énergie mécanique est reçue et transformée en énergie électrique. Actuellement, on distingue principalement trois types de systèmes éoliens en fonction du type de génératrice utilisé.



: [22]

Figure I-22 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

I.5.2.6.1 Eoliennes à vitesse fixe

Le système éolien en question est composé d'un générateur d'induction à cage directement relié au réseau électrique. La fréquence du réseau, ainsi que le nombre de pôles du générateur, déterminent la vitesse du générateur et de la turbine avec une marge de glissement (voir Figure I-23). Un multiplicateur de vitesse est utilisé pour entraîner le générateur à une vitesse maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Par conséquent, la vitesse de rotation de la turbine reste pratiquement constante quelle que soit la vitesse du vent. Cette configuration correspond donc à un générateur éolien à vitesse fixe. Il convient de noter que les générateurs asynchrones à cage consomment toujours de la puissance réactive, ce qui est indésirable. Pour compenser cette consommation, des bancs de condensateurs ou d'autres dispositifs de compensation réactive sont généralement utilisés en partie ou en totalité.

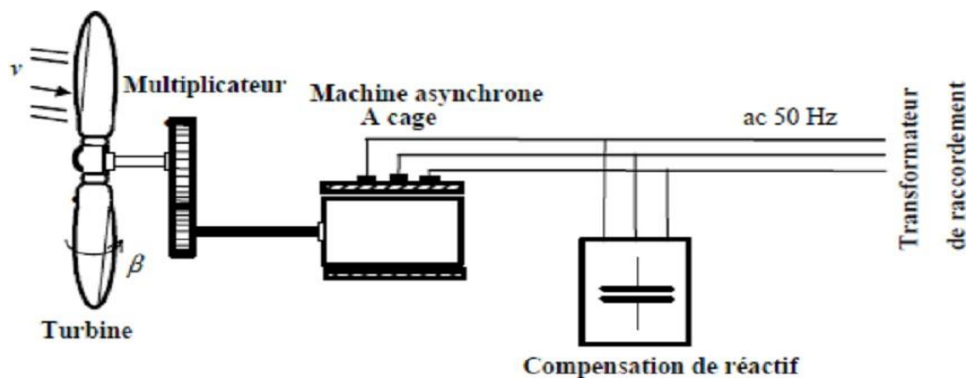


Figure I-23 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage [16]

I.5.2.6.2 Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator

Les machines électrique qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage et synchrone à aimant permanent (Figure I-24). Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence du réseau sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière, la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

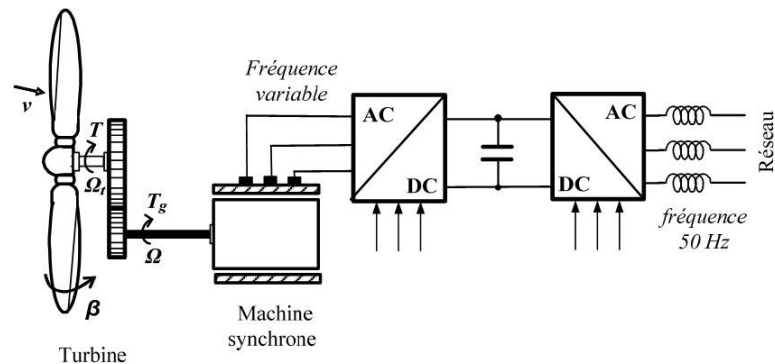


Figure I-24 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone [16]

I.5.2.6.3 Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) (Figure I.25).

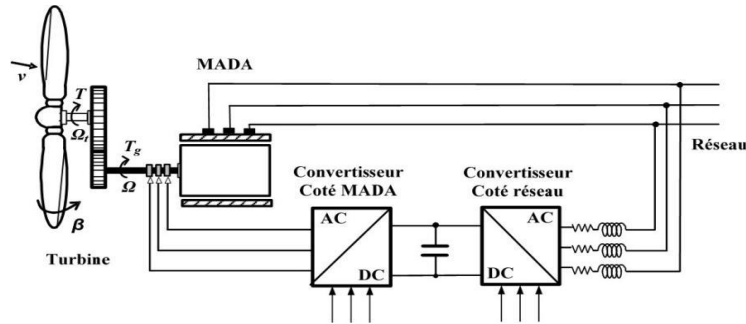


Figure I-25 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [16]

I.5.3 Générateur diesel

Dans ce système, le groupe électrogène est généralement composé d'un moteur diesel (voir Annexe I) qui est directement couplé à un générateur synchrone ou à un alternateur (voir Figure I-26). Pour maintenir la fréquence du courant alternatif à la sortie, un régulateur de vitesse est utilisé sur le moteur diesel [12]. Ce régulateur ajuste le débit de carburant du moteur diesel afin de maintenir la vitesse du moteur et de l'alternateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur, ce qui permet de maintenir la fréquence au niveau souhaité.

. [23]

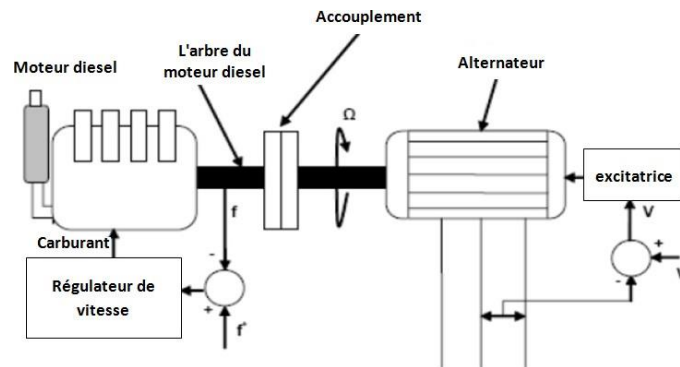


Figure I-26 : Configuration du générateur diesel [23]

Contrairement à un moteur diesel d'automobile, un moteur diesel utilisé dans un groupe électrogène doit fonctionner à une vitesse constante tout en permettant une variation du couple. Cela est dû au fait que la fréquence des tensions produites par le générateur doit respecter la relation suivante :

$$\omega_{sync} = p\omega_e \quad (I.21)$$

Dans cette équation, ω_{sync} représente la vitesse angulaire (vitesse synchrone) de l'arbre du groupe électrogène diesel, $\omega_e = 2\pi f$ est la pulsation des courants statoriques de la génératrice synchrone du groupe, et p est le nombre de paires de pôles de la génératrice. Ainsi, la consigne de vitesse est appliquée sous forme de fréquence souhaitée, et le système de régulation de la

vitesse de la turbine se charge d'ajuster le couple moteur (T_m) de manière à maintenir la vitesse de rotation constante.

I.5.3.1 Réseaux autonome alimenté par centrale diesel

II Les réseaux de courant alternatif alimentés par des centrales diesel, tout comme les réseaux interconnectés, fournissent deux formes d'énergie à leurs charges : l'énergie active et l'énergie réactive. Dans les processus industriels et domestiques qui utilisent l'énergie électrique, seule l'énergie active est convertie en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc., au sein des dispositifs de production. En revanche, l'énergie réactive est principalement utilisée pour alimenter les circuits magnétiques des machines électriques telles que les moteurs, les autotransformateurs, etc. En réalité, l'énergie réactive n'est pas consommée, mais les courants associés à la puissance réactive entraînent des pertes supplémentaires dans le système. La puissance réactive dans un système de courant alternatif avec générateur diesel est produite par l'alternateur, qui ajuste également la tension en régulant le courant d'excitation. Par conséquent, dans un système d'énergie en courant alternatif avec plusieurs générateurs diesel, il est nécessaire d'avoir au moins un générateur diesel connecté au réseau pour fixer la fréquence du réseau et fournir la puissance réactive. Il est possible de modifier le système de sorte que le générateur diesel ne soit pas toujours sollicité, mais cela nécessite l'ajout d'autres composants.

IV.5.3.1 Fonctionnement des groupes diesel

V Lorsque plusieurs groupes diesel alimentent une charge, ils sont généralement connectés à un bus en courant alternatif (CA). Dans ce cas, un système de commande est nécessaire pour une distribution appropriée de la puissance fournie par les groupes diesel. Ce système de commande peut prendre différentes formes, mais le plus courant est le système de commande numérique. Une approche consiste à utiliser un générateur unique pour fixer la fréquence du réseau (générateur maître), tandis que les autres fonctionnent à une charge fixe (générateurs esclaves) en maintenant un débit de carburant constant. Une autre approche consiste à répartir la charge entre tous les groupes en fonction de leur puissance nominale. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est réglé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'utilisation du carburant.

V.5.3 Systèmes de stockage

Il existe diverses méthodes de stockage de l'électricité, qui impliquent généralement sa conversion en une autre forme d'énergie plus facile à conserver, telle que l'énergie chimique. Seuls les systèmes de stockage électromagnétique et électrostatique permettent de stocker l'électricité sous forme de charges électriques. Le stockage électrochimique est largement utilisé dans les applications stationnaires et bénéficie d'une expérience de plus de cinquante ans, en particulier grâce à son utilisation dans les véhicules automobiles. Son coût

relativement bas et son excellent taux de recyclage en font un élément essentiel du stockage dans les systèmes électriques. La technologie des accumulateurs offre une grande diversité. Les batteries couramment utilisées sont généralement du type plomb-acide, tandis que les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Leur capacité est généralement spécifiée en ampères-heures (Ah), représentant l'énergie délivrée lorsque la batterie passe d'un état de charge à un état où la tension chute brusquement, également appelée tension de "cut-off" (Figure I-27). Il convient de noter que la capacité de la batterie dépend du courant de décharge (Figure I-28). On peut observer sur ce graphique que la capacité est réduite lorsque le courant de décharge est élevé.

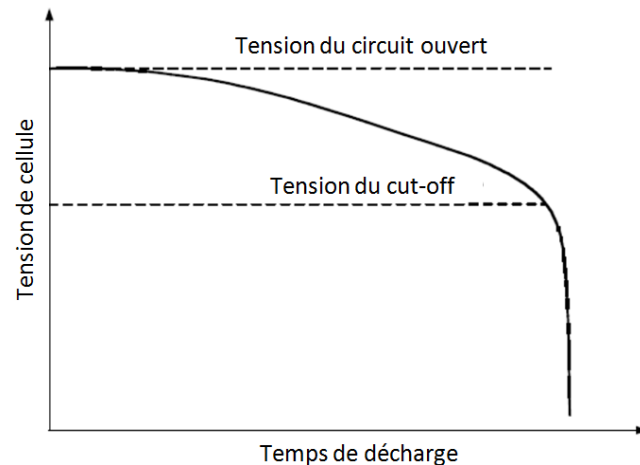


Figure I-27 : Tension de « cut-off » d'une batterie [12]

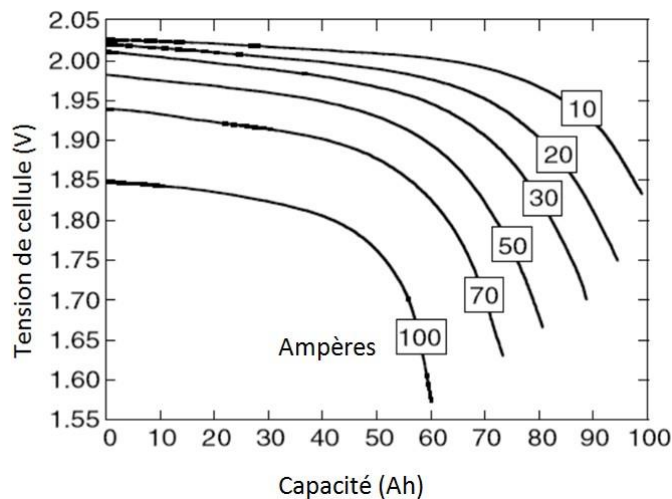


Figure I-28 : Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb [12]

V.5.4 Convertisseurs :

Les systèmes de conversion des énergies renouvelables utilisent des convertisseurs pour charger les batteries de stockage et pour convertir le courant continu en courant alternatif, et vice versa. Trois types de convertisseurs sont couramment utilisés dans les énergies renouvelables : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. [24]

Les redresseurs effectuent la conversion du courant alternatif en courant continu. Dans les systèmes multi-sources, ils sont souvent utilisés pour charger les batteries à partir d'une source de courant alternatif. Ce sont des dispositifs relativement simples, économiques et efficaces.

Les onduleurs convertissent le courant continu en courant alternatif. Ils peuvent fonctionner de manière autonome pour alimenter des charges en courant alternatif, ou en parallèle avec des sources de courant alternatif. Les onduleurs autonomes définissent leur propre fréquence de sortie pour la charge, tandis que les onduleurs non autonomes nécessitent la présence d'une source de courant alternatif pour fonctionner. Certains onduleurs peuvent fonctionner dans les deux modes : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ces onduleurs sont plus flexibles mais aussi plus coûteux. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont combinées dans un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion de courant continu à courant continu, par e

V.5.5 Charges :

Les charges électriques rendent utile une puissance électrique. Il existe des charges à caractères résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont de charge résistive et inductives. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

Les charges à DC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie.

V.5.6 Système d'exploitation :

La plupart des systèmes hybrides Figure I-29 intègrent un système de commande pour assurer leur bon fonctionnement. Par exemple, les chargeurs de batteries sont souvent équipés d'un système de commande pour éviter la surcharge ou la décharge excessive des batteries. Dans les réseaux multi-diesel, des méthodes relativement complexes peuvent être utilisées pour gérer les générateurs diesels et réguler le flux de puissance. Parfois, la commande est intégrée

individuellement à chaque composant du système. Des exemples de commandes intégrées comprennent le régulateur de vitesse du moteur diesel, le régulateur de tension de l'alternateur ou la commande de l'éolienne. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Ce système de surveillance est généralement automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure le démarrage et l'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, la charge des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges

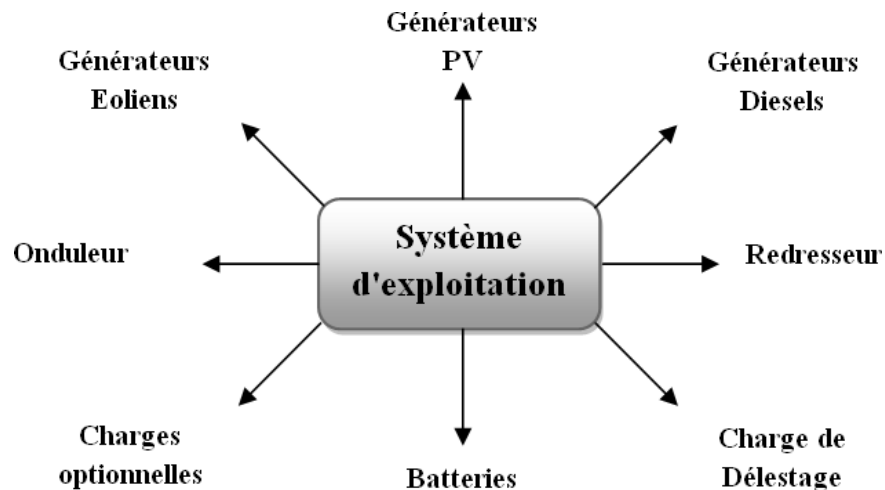


Figure I-29 : Système d'exploitation pour un système PV-E-D

I.6 Etude de différentes structures du système d'énergie hybride :

En plus des générateurs diesels, d'une éolienne et d'un générateur photovoltaïque, un système multi-source peut également inclure un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées selon différentes architectures. Dans la plupart des systèmes hybrides classiques, il existe deux bus : un bus à courant continu pour les sources, les charges à courant continu et les batteries, et un bus à courant alternatif pour les générateurs à courant alternatif et le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées soit au bus à courant alternatif, soit au bus à courant continu, en fonction de la taille et de la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée à l'aide de l'électronique de puissance, tels que des onduleurs/redresseurs ou des convertisseurs bidirectionnels.

En plus de la charge principale, un système hybride peut également comprendre des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour maintenir l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée en continu, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, uniquement lorsqu'il y a un surplus d'énergie disponible. Ainsi, dans un système multi-source avec des batteries de stockage et des charges auxiliaires, tout excès d'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable et des générateurs diesels est d'abord stocké dans les batteries, puis utilisé pour alimenter les autres

charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : elles sont à la fois une source d'énergie et une charge.

I.6.1 Configuration à bus à DC :

Dans cette configuration, l'énergie produite par chaque source est regroupée et fournie sur un bus à courant continu (CC). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie en courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour la convertir en courant continu. Les générateurs diesel sont connectés en série avec l'onduleur afin d'alimenter les charges en courant alternatif. Les générateurs diesel ne peuvent donc pas alimenter directement les charges en courant alternatif. L'onduleur doit fournir le courant alternatif à partir du bus à courant continu et doit suivre les consignes fixées pour l'amplitude et la fréquence du courant. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour fournir de l'énergie lors de pics de charge, tandis que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter à la fois les pics de charge et les batteries (Figure I-30). La puissance délivrée peut être contrôlée en ajustant le courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont présentés ci-dessous.

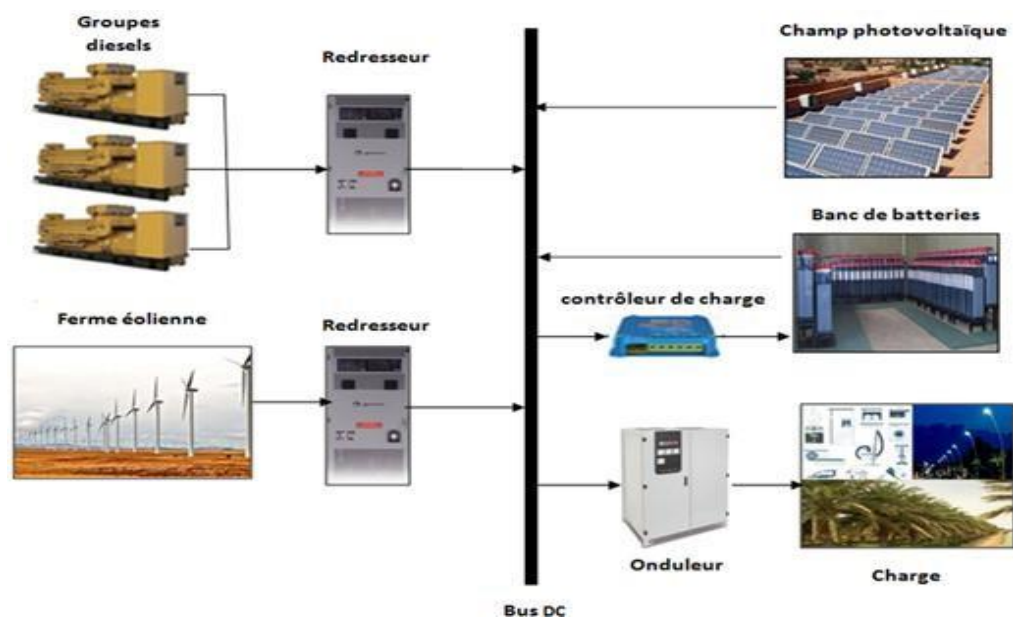


Figure I-30 : Configuration du système PV-E-D à bus à DC

Avantages :

- La connexion de toutes les sources sur un bus à DC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

Inconvénients :

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

I.6.2 Configuration à bus à AC

Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs excepté le Générateur Diesel qui peut fixer la fréquence du bus (Figure I-31) [25].

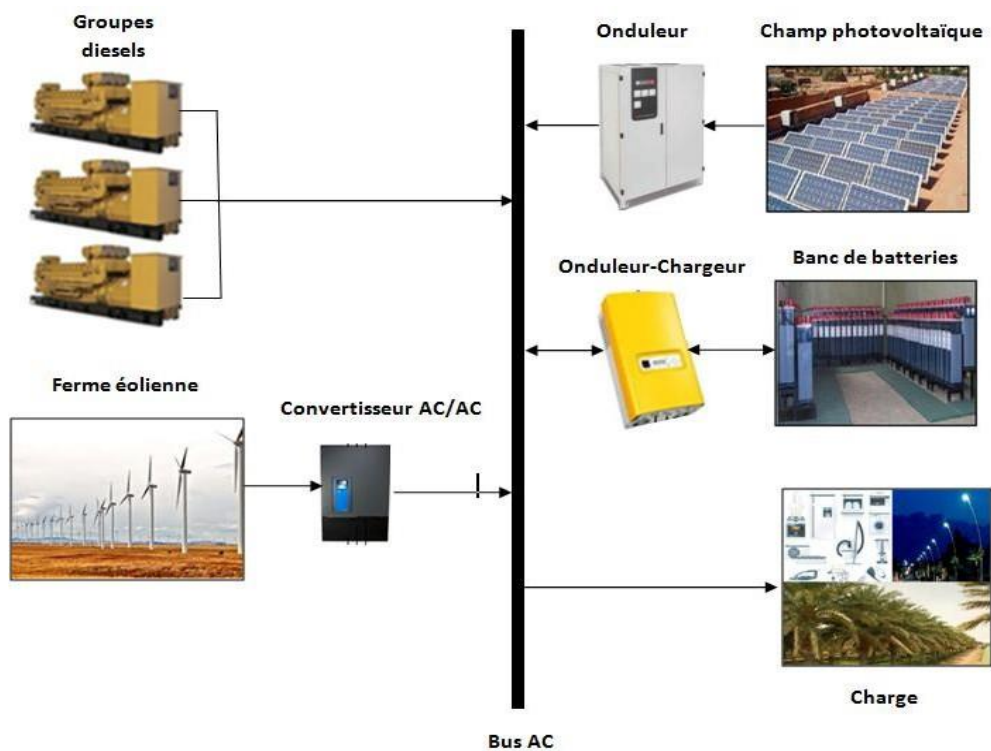


Figure I-31 : Configuration du système PV-E-D à bus à AC

Avantages :

- Un découplage des différents sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence du bus.

Inconvénients :

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- La connexion de toutes les sources sur un bus à AC complique le système de commande
- Les charges continues pouvaient être connectées directement sur les sources continues ou en utilisant un redresseur [23].

I.6.3 Configuration à mixte à bus à DC/AC :

La configuration à deux bus, à courant continu (CC) et à courant alternatif (CA), est illustrée dans la figure I-32. Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration précédente. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter directement une partie de la charge en courant alternatif, ce qui permet d'optimiser le rendement du système et de réduire la puissance nominale du générateur diesel et de l'onduleur. Le générateur diesel (GD) et l'onduleur peuvent fonctionner de manière autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions de sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel qui, dans des conditions normales de fonctionnement, assure la conversion du courant continu en courant alternatif (fonctionnement de l'onduleur). Lorsqu'il y a un surplus d'énergie provenant du générateur diesel, celui-ci peut également charger les batteries (fonctionnement du redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut fournir de l'énergie lors des pics de charge lorsque le générateur diesel est surchargé.

Avantages :

- Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner de manière autonome ou en parallèle. Lorsque la charge est faible, l'un ou l'autre peut générer l'énergie requise. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- Possibilité de réduire la puissance nominale du générateur diesel et de l'onduleur sans compromettre la capacité du système à alimenter les pics de charge.

Inconvénients :

- La mise en œuvre de ce système est relativement complexe en raison du fonctionnement en parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner de manière autonome et non autonome en synchronisant les tensions de sortie avec celles du générateur diesel).

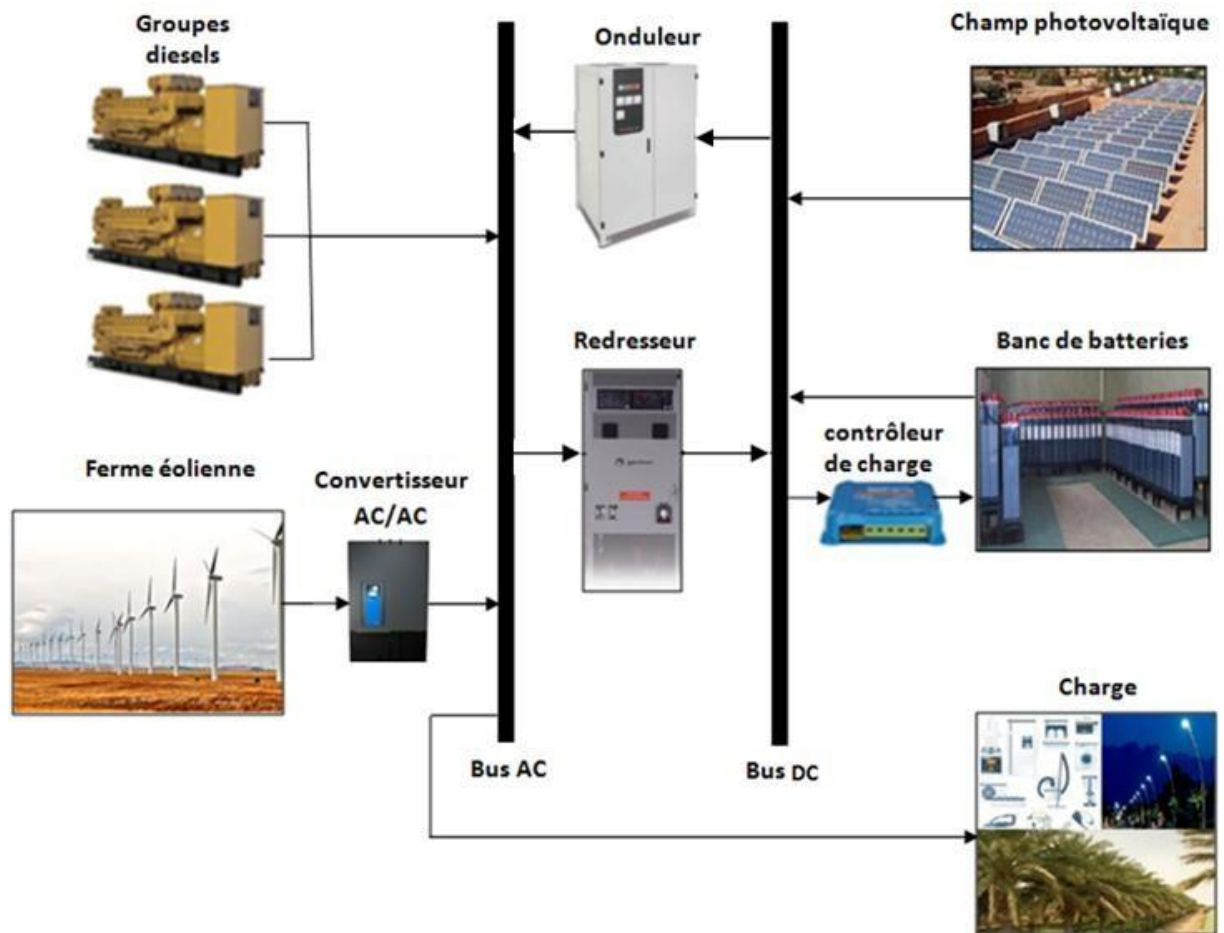


Figure I-32 : Configuration du système PV-E-D à bus mix AC/DC

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, une description succincte du système multi-sources PVED a été réalisée. Les principaux concepts liés à la technologie utilisée dans ce système ont été abordés. Ce travail se concentre sur un système PVED qui intègre une éolienne, des panneaux photovoltaïques, un générateur diesel et des batteries de stockage. Les différentes architectures existantes, ainsi que les problèmes et les stratégies de commande couramment utilisées dans les systèmes PVED, ont également été présentés.

Le fonctionnement des composants du système PVED doit prendre en compte les variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles afin de maximiser l'utilisation des ressources renouvelables.

Références bibliographiques

- [1] **L. STOYANOV**, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat, Université De Corse Pasquale Paoli et Université Technique De Sofia, 2011.
- [2] **D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA**, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 623–633, 2008.
- [3] **M. ZANDI**, « Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique », Thèse de doctorat, NANCY Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [4] **www.neal - dz.net** : New Energy Algeria , 2009 .
- [5] **Ministère de l'énergie et des mines**, « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique », SATINFO, Algérie." www.aprue.org.dz"
- [6] **I. VECHIU**, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.
- [7] **A. OULD MAHMOUD**, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixte » thèse de doctorat de Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2008.
- [8] **L. ABBASSEN**, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [9] **D. LU**, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [10] **S. VIGHETTI**, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [11] **M. A. CAMARA**, « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs » Thèse de doctorat, Université Paris Est Créteil, 2011.

[12] **S. BELAKEHAL**, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédié aux Energies Renouvelables » Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.

[13] **S. PETIBON**, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.

[14] <http://lprl.org/cascade-light-technologies.php>

[15] **F. POITIERS**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à doublealimentation reliée au réseau » thèse doctorale, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[16] **T. GHENNAM**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger & Ecole Centrale de Lille, 2011.

[17] **N. KASBADJI MERZOUK**, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.

[18] **L. LOUZE**, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.

[19] **G. AGGOUN**, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », Mémoire de Magister, Université de Mouloude Mamri Tizi ousou.

[20] **N. FICHAUX, J. BEURSKENS, P. H. JENSEN et J. WILKES**, « UpWind Design limits and solutions for very large wind turbines », European Wind Energy Association (EWEA), 2011.

[21] **O. GERGAUD**, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, 2002.

[22] **H. GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI**, « Etude de structures d'intégration des

systèmes de génération décentralisée : application aux microréseaux», thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 2006.

[23] **F. BAGHDADI**, « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[24] **G. SIGUIER**, «L'électronique de puissance», Edition DUNOD 1990

[25] http://www.riaed.net/IMG/pdf/Seminaire_de_renforcement_des_capacites_en_energies

[26] **LAROUÏ Rachid**, « Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar » , Thèse Mémoire de Magister, Université Ahmed Draya Adrar , 2015

[27] **PROF. RACHNA GARG CHETAN PRAKASH DEEPAK KUMAR** « TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PROJECT REPORT MODELING AND SIMULATION POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION » , Delhi technological university, 2018

[28] <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/24-hour-simulation-of-a-vehicle-to-grid-v2g-system.html> bibliothèque math Works V2G system

CHAPITRE 2

Modélisation des éléments du
systeme d'énergie multi-source

PV-E-D

II.1 Introduction

La modélisation est une approche visant à représenter un processus technologique sous une forme mathématique. Son objectif est d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser tout en respectant une contrainte spécifique. Ainsi, il est nécessaire de modéliser le système d'énergie multi-source PV-E-D afin d'établir une relation directe entre l'énergie produite par le système et la demande d'utilisation. L'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année est obtenue à travers une étude théorique et expérimentale.

Dans ce contexte, ce chapitre présentera en premier lieu la modélisation du système hybride PV-E-D. Nous proposerons l'élaboration de modèles mathématiques pour les systèmes de production afin de mieux comprendre leur exploitation, notamment en ce qui concerne les flux de puissance de production en fonction des conditions météorologiques réelles ou estimées.

II.1 Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

Le but de cette section est de décrire les modèles mathématiques des différents composants de la chaîne de production photovoltaïque. Ce système est basé sur des blocs modulaires, comme présenté dans la figure II-1.

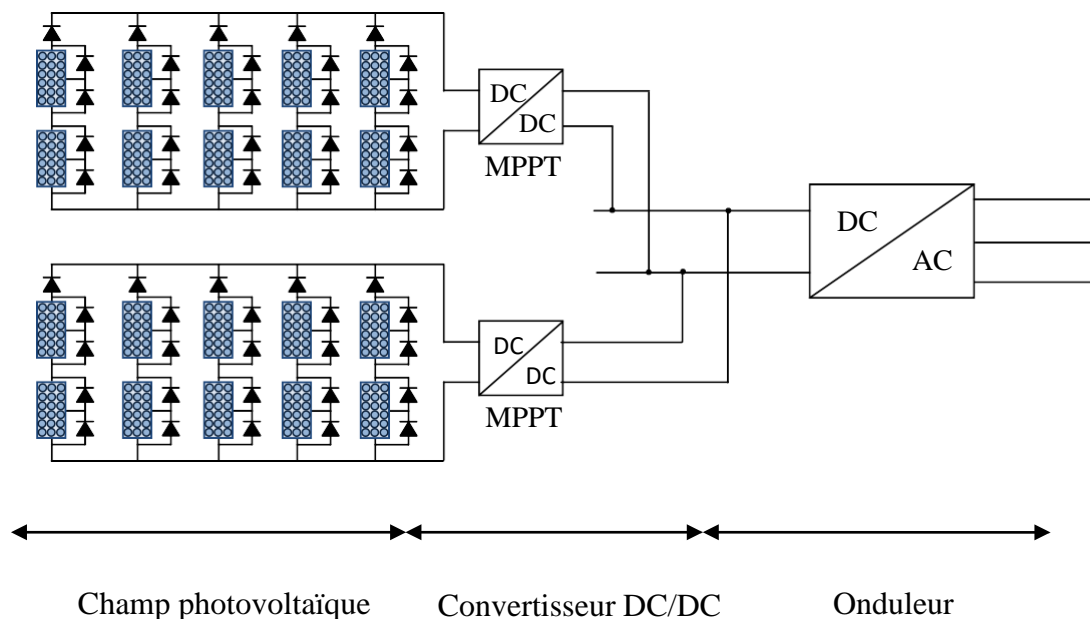


Figure II-1 : Chaîne production photovoltaïque

La modélisation de la chaîne de production photovoltaïque avec un module MPPT (Maximum Power Point Tracking), un convertisseur DC-DC et un onduleur est une approche courante pour simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque complet. Voici comment chaque composant peut être modélisé

a-Module MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Le module MPPT dans la Figure II-2 est utilisé pour suivre le point de puissance maximale du panneau photovoltaïque en ajustant la tension ou le courant de sortie pour maximiser la puissance produite. Il existe plusieurs algorithmes de suivi du point de puissance maximale, tels que P&O (Perturb and Observe), IncCond, etc.

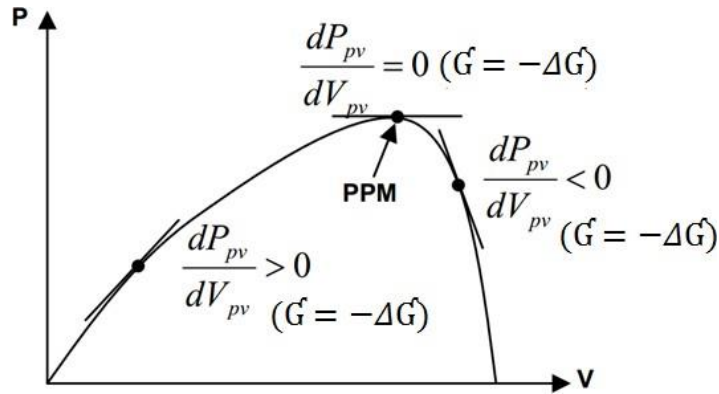


Figure II-2 : Recherche du MPP par la méthode de l'incrément de la conductance

b-Convertisseur DC-DC :

Le convertisseur DC-DC dans la Figure II-3 est utilisé pour adapter la tension continue générée par le panneau photovoltaïque au niveau de tension requis pour la charge ou le stockage. Il peut également agir comme une interface entre le panneau et le système d'alimentation.

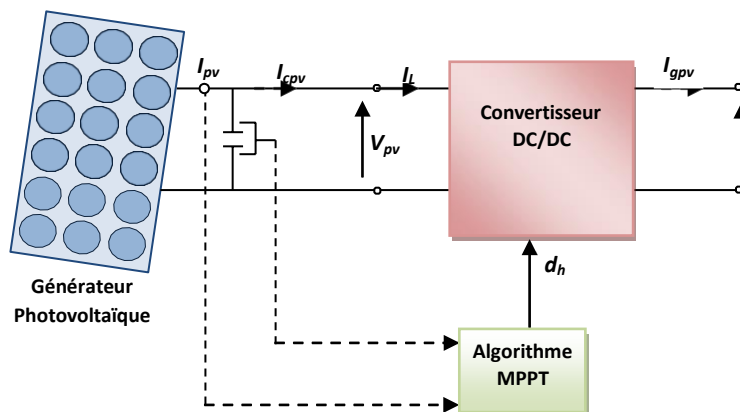


Figure II-3 : Schéma détaillé du système de conversion photovoltaïque

c-Onduleur :

L'onduleur est utilisé pour convertir le courant continu généré par le panneau photovoltaïque en courant alternatif, qui est utilisé dans la plupart des réseaux électriques. L'onduleur a également des fonctions de contrôle de la tension de sortie et de la fréquence, et il peut fournir de l'énergie au réseau.

II.2.1 Modélisation du panneau photovoltaïque

L'objectif est de Modéliser la puissance fournie par les panneaux photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques c'est à dire l'éclairement dans les panneaux solaires G et leur surface A .

II.2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle le plus couramment utilisé est le modèle à une diode pour représenter les phénomènes de polarisation de la cellule photovoltaïque, associé à un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, ainsi que deux résistances (série et shunt) pour prendre en compte les pertes. Le schéma équivalent qui en résulte est illustré dans la Figure II-4.

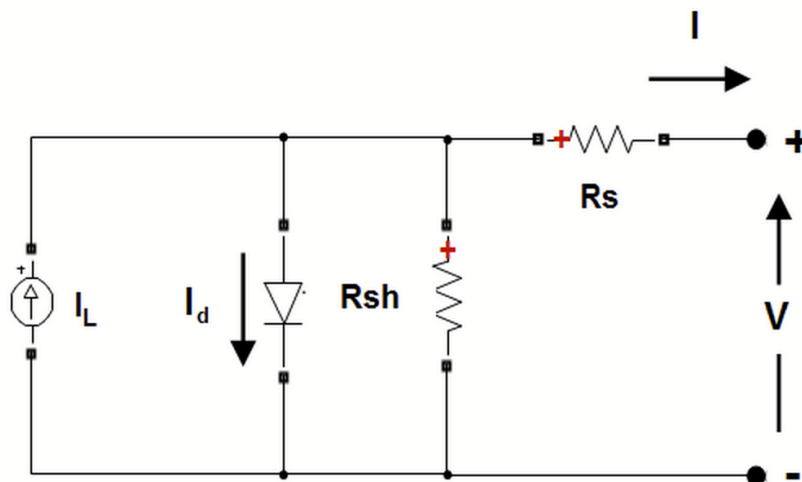


Figure II-4 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

On utilise le bloc de puissance photovoltaïque (PV Power) pour générer la puissance électrique produite par vos panneaux solaires en fonction des conditions météorologiques, puis on convertit cette puissance en courant en utilisant Simscape Power Systems Currents.

a-Bloc de Puissance Photovoltaïque (PV Power) :



Figure II-5 : Schéma général du bloc PV Power est utilisé pour simuler la production d'énergie électrique par vos panneaux solaires en réponse aux conditions météorologiques, à savoir l'éclairement solaire (G) et la surfaces des panneaux solaires (area).

b-Entrées du Bloc PV Power :

Les entrées du bloc PV Power sont généralement l'éclairement solaire (G) et la surface des panneaux solaires (area). Ces deux paramètres sont cruciaux pour déterminer la puissance électrique générée.

II .2.3Modélisation de la Puissance Photovoltaïque :

Le bloc PV Power Figure II-5 intègre des modèles mathématiques ou empiriques qui représentent comment la puissance électrique produite par les panneaux solaires varie en fonction de l'éclairement solaire et de la température.

Ces modèles tiennent compte des caractéristiques électriques des panneaux, de l'efficacité, des pertes thermiques, etc.

a-Calcul de la Puissance Électrique :

Le bloc PV Power utilise les valeurs d'éclairement solaire (G) et la surface des panneaux solaires (area) pour calculer la puissance électrique produite par les panneaux photovoltaïques.

b-Conversion en Courants Simscape Power Systèmes :

Après avoir calculé la puissance électrique, vous pouvez convertir cette puissance en courant qui sera utilisé dans Simscape Power Systems Currents.

Les courants ainsi générés seront utilisés pour modéliser le comportement de votre système hybride en utilisant Simscape Power Systems.

Simulation et Analyse On peut effectuer des simulations en faisant varier l'éclairement solaire et la température des panneaux solaires pour voir comment la puissance électrique et les courants changent en fonction des conditions météorologiques.

Les entrées du bloc PV Power sont l'éclairement solaire (G) et la surface des panneaux solaires (area), voici comment ces deux paramètres sont modéliser pour déterminer la puissance électrique générée par vos panneaux photovoltaïques :

II .2.4Éclairement Solaire (G) :

L'éclairement solaire est la quantité de puissance lumineuse solaire reçue par unité de surface. Plus l'éclairement solaire est élevé, plus la quantité d'énergie lumineuse est disponible pour être convertie en énergie électrique par les cellules photovoltaïques, notre projet photovoltaïque de 8 MW qu'on souhaite effectuer une simulation avec un suivi précis de l'irradiation solaire et du facteur de l'ombre (SHADE) sur une période de 24 heures dans tableau V2G.IRRADIANCE.SUN Matlab comme la montre la Figure II-6

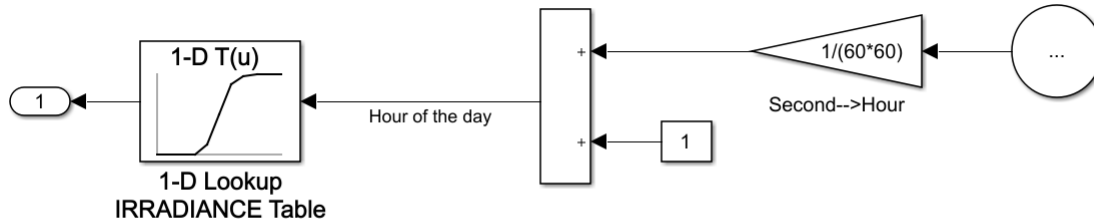


Figure II-6 : schéma du bloc de changement de IRRADIANCE TABLE DATA

a-Le facteur de l'ombre (PARTIAL SHADING) :

Ce dernier est modélisé par un facteur disponibilité incendiaire partielle comme le montre la Figure Signal disturbance (mask) for irradiation Figure II-7

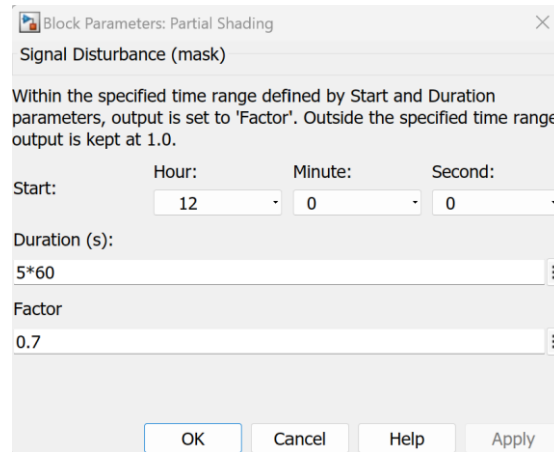


Figure II-7 : Signal disturbance (mask) for irradiation

b-L'effet de l'irradiation solaire et la surface sur la puissance fournis par le panneau photovoltaïque :

La puissance électrique P générée par un panneau photovoltaïque est directement proportionnelle à l'irradiance solaire G . Mathématiquement, cela peut être exprimé comme :

$$P = G \times A \times \eta \times \eta_{\text{MPPT}} \quad (\text{II.1})$$

- P est la puissance électrique générée (en watts).
- G est l'irradiance solaire (en watts par mètre carré).
- A est la surface effective du panneau photovoltaïque (en mètre carré).
- η est l'efficacité de conversion du panneau.
- η_{MPPT} est l'efficacité du point de puissance maximale (MPPT).

L'efficacité de conversion η représente la capacité du panneau à convertir l'énergie solaire en électricité. Elle est généralement inférieure à 100% en raison de pertes thermiques et électriques.

L'efficacité du MPPT η_{MPPT} prend en compte le fait que le point de puissance maximale (MPPT) change en fonction de l'irradiance. Cela signifie que même si le panneau a une efficacité de conversion donnée, il ne fonctionnera pas toujours à cette efficacité maximale en raison des variations de MPPT.

En résumé, l'irradiance solaire G et la surface A sont les facteurs principaux qui influencent la puissance électrique générée par un panneau photovoltaïque. Plus l'irradiance et la surface sont élevée, plus la puissance générée sera élevée, selon la relation mathématique décrite ci-dessus.

II .2.5 Surface des Panneaux Solaires (Area) :

La surface des panneaux solaires fait référence à la taille totale des panneaux exposée à la lumière solaire. Une plus grande surface signifie plus de cellules photovoltaïques pouvant convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique, comme le montre la Figure II-8 .

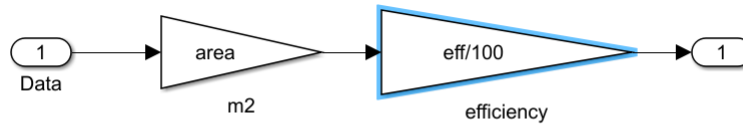


Figure II-8 : La relation entre l'efficacité et la surface du panneau solaire

Le bloc PV Power utilise ces deux paramètres pour calculer la puissance électrique générée. La puissance électrique dépend de la quantité d'énergie lumineuse incidente (éclairage solaire) et de la capacité des cellules photovoltaïques à convertir cette énergie en énergie électrique (surface des panneaux solaires).

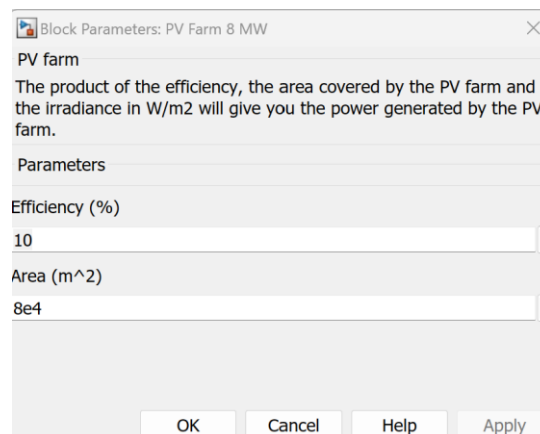


Figure II-9 : représente les paramètres d'efficacité et de surface de des panneaux photovoltaïque

En combinant l'éclairage solaire (G) et la surface des panneaux solaires (area) comme dans la Figure II-9 avec l'efficacité du panneau photovoltaïque, le bloc PV Power effectue des calculs basés sur des modèles mathématiques ou empiriques pour estimer la puissance électrique produite. Ces modèles prennent en compte la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique, les pertes et l'efficacité du processus.

En conclusion, l'éclairage solaire et la surface des panneaux solaires sont deux paramètres clés pour obtenir une estimation précise de la puissance électrique générée par vos panneaux photovoltaïques. Ces paramètres permettent au bloc PV Power de calculer la puissance en fonction de la quantité d'énergie

II .2.6 Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux, présentés aussi dans la figure II-3

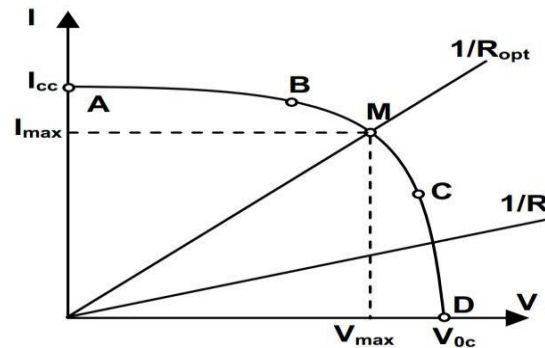


Figure II-10 : Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque [5]

a-Courant de Court-Circuit (I_{cc}) :

Explication : Le courant de court-circuit représente le courant maximal que la cellule solaire peut fournir lorsqu'elle est court-circuitée, c'est-à-dire sans charge connectée.

Équation :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 * (\exp(V_d / (nI * V_t)) - 1) \quad (II.2)$$

I_{ph} : Courant de photogénération (proportionnel à l'intensité de la lumière solaire)

I_0 : Courant de saturation de la diode (caractérise les pertes dues à la recombinaison)

V_d : Tension aux bornes de la diode (circuit ouvert)

nI : Facteur d'idéalité de la diode (mesure la déviation par rapport à la loi d'idéalité)

V_t : Tension thermique, calculée à partir du facteur d'idéalité et des constantes physiques

b-Tension à Vide (V_{co}) :

Explication : La tension à vide est la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsque le courant est nul (circuit ouvert). Elle est influencée par les propriétés de la diode et les caractéristiques de la cellule.

Équation :

$$V_{co} = nI * V_t * \ln(I_{ph} / I_0 + 1) \quad (\text{II. 3})$$

V_t : Tension thermique (proportionnelle à la température)

I_{ph} : Courant de photogénération (proportionnel à l'intensité de la lumière solaire)

I_0 : Courant de saturation de la diode

c-Facteur d'Idéalité de la Diode (n) :

Explication : Le facteur d'idéalité de la diode est une constante qui caractérise le comportement de la diode dans la cellule solaire. Il peut varier autour de 1, et des valeurs élevées indiquent une déviation par rapport à la loi d'idéalité.

Équation : Ce facteur est généralement fourni comme une constante dans le modèle.

d-Courant de Saturée de la Diode (I_0) :

Explication : Le courant de saturation de la diode est une constante qui modélise les pertes dues à la recombinaison de porteurs de charge à travers la diode de la cellule solaire.

Équation : Ce courant est généralement fourni comme une constante dans le modèle.

e-Coefficient de Température de la Tension à Vide (TCVoc) :

Explication : Le coefficient de température de la tension à vide mesure comment la tension à vide varie avec la température. Les valeurs positives indiquent une diminution de la tension à vide avec l'augmentation de la température.

Équation :

$$TCVoc = -V_t / nI \quad (\text{II.4})$$

V_t : Tension thermique (proportionnelle à la température)

nI : Facteur d'idéalité de la diode

f-Coefficient de Température du Courant de Court-Circuit (TCIsc) :

Explication : Le coefficient de température du courant de court-circuit mesure comment le courant de court-circuit varie avec la température. Les valeurs négatives indiquent que le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la température.

Équation :

$$TCIsc = I_{ph} * TC_{Voc} / V_{co} \quad (II.5)$$

I_{ph} : Courant de photogénération (proportionnel à l'intensité de la lumière solaire)

TC_{Voc} : Coefficient de température de la tension à vide

V_{co} : Tension à vide

II .2.7Modèle simplifié du module photovoltaïque (Convert Solar Power from the Data block to Simscape Power Systems Currents)

Ce bloc dans la Figure II-11 issu de la bibliothèque Matlab convertit le signal d'entrée Simulink en une source de courant équivalente. Le courant généré est contrôlé par le signal d'entrée du bloc.

On a la possibilité d'initialiser notre circuit avec un courant alternatif (AC) ou continu (DC) spécifique. Si on souhaite démarrer la simulation en régime permanent, l'entrée du bloc doit être connectée à un signal qui débute sous forme d'onde sinusoïdale ou continue correspondant aux valeurs initiales. Cette approche nous permet d'éviter la modélisation du module MPPT (Maximum Power Point Tracking) et des convertisseurs AC-DC dans la simulation de votre système.

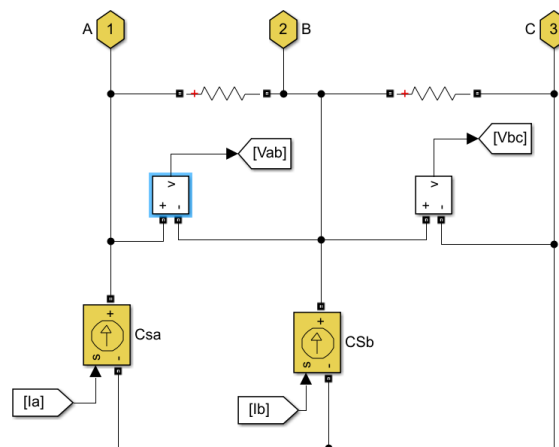


Figure II-11 : de la Puissance Solaire à partir du bloc de Données convertis en Courants dans Simscape Power Systems

Les blocs de source de courant contrôlée sont utilisés dans les outils de simulation électrique pour fournir un courant constant ou variable dans un circuit électrique. Ces blocs sont contrôlables, ce qui signifie que on peut définir leur valeur ou leur comportement en fonction de vos besoins de modélisation. Ils sont souvent utilisés pour représenter des sources de courant spécifiques, des charges, ou d'autres éléments électriques dans un réseau. Dans notre cas qui représentent les différents source de notre system hybride

Voici comment ils pourraient être utilisés :

a-CSA ou CBA (Controlled Current Source A or B) :

Ce bloc peut être utilisé pour fournir un courant contrôlé dans un circuit électrique. On peut spécifier la valeur du courant qu'on souhaite fournir ou le modèle de comportement du courant en fonction du temps, l'irradiation et la surface

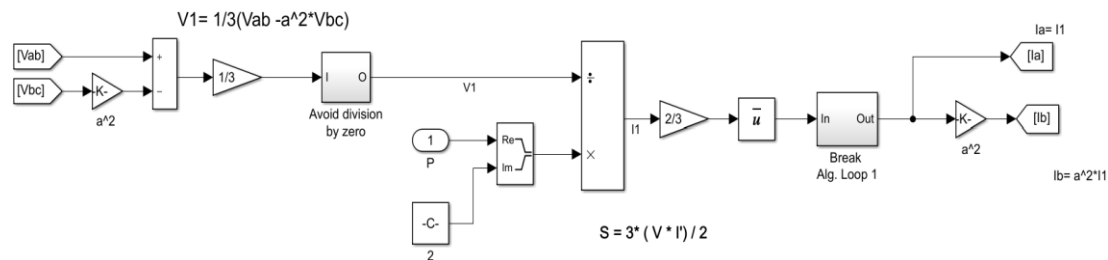


Figure II-12 qui représente la relation mathématique qui est générée dans le bloc photovoltaïque pour fournir une source de courant contrôlé

Les équations données dans Figure II-12, sont utilisées pour calculer les valeurs de tensions et de puissance apparente en fonction de différentes grandeurs. Dans le contexte de la cellule photovoltaïque, elles pourraient être utilisées pour modéliser le comportement de la cellule en fonction de l'irradiation solaire. Voici une explication plus détaillée de ces équations :

b-Équation pour V1 :

V1 est calculé en fonction des tensions Vab et Vbc, ainsi que de la constante a. L'équation peut être interprétée comme une combinaison linéaire des tensions Vab et Vbc, avec une correction basée sur le facteur a. Cette combinaison pourrait être utilisée pour ajuster la tension de sortie en fonction des valeurs mesurées de Vab et Vbc, potentiellement pour compenser des déséquilibres ou des caractéristiques spécifiques de votre système.

Mathématiquement :

$$V1 = (1/3) * (Vab - a^2 * Vbc) \quad (II.6)$$

c-Équation pour S :

S représente la puissance apparente et est calculé en fonction de la tension (V) et du courant (I). L'équation multiplie simplement le produit de la tension et du courant par un facteur constant (3/2). Cette équation peut être utilisée pour calculer la puissance apparente d'une cellule photovoltaïque en fonction de sa tension et de son courant de sortie.

Mathématiquement :

$$S = (3/2) * (V * I) \quad (II.7)$$

d-Utilisation pour Controlled Current Source A and B :

On utilise ces équations pour modéliser un Controlled Current Source A et B en fonction de l'irradiation solaire pour une cellule photovoltaïque.

Les équations sont utilisées pour définir les courants Ia et Ib des sources de courant contrôlées en fonction des valeurs calculées de V1 et S, ajustées en fonction de l'irradiation solaire mesurée ou modélisée qui affecte la puissance P électrique Générer en (watt)

II.3 Modélisation de la chaîne de production éolienne

Il existe une relation directe entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne, car l'éolienne tire son énergie du vent. Cette relation est illustrée dans la Figure II-13.

10]

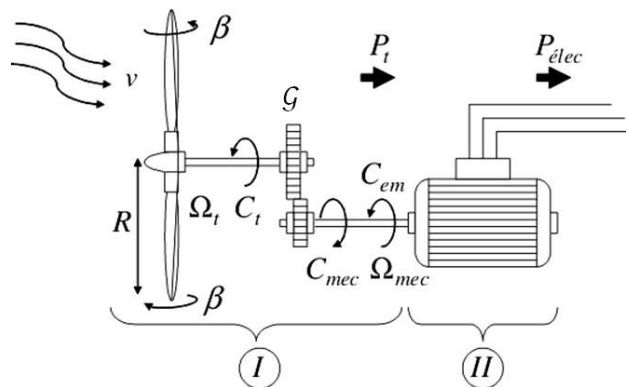


Figure II-13 : Modèle de la turbine éolienne

II .3.1 La modélisation de l'interférence du vent sur une éolienne :

Est un domaine complexe qui nécessite une compréhension approfondie de la dynamique des fluides et de la mécanique des éoliennes. Cependant, je peux vous fournir une explication générale sur les principaux éléments à considérer lors de la modélisation de l'interférence du vent sur une éolienne :

a-Caractéristiques du Vent : Il est important de modéliser les caractéristiques du vent, telles que la vitesse, la direction et le profil de turbulence. Les éoliennes sont influencées par des variations spatiales et temporelles du vent, et il est essentiel de capturer ces variations dans le modèle.

b-Profiles de Vitesse du Vent : Les éoliennes sont conçues pour fonctionner dans certaines plages de vitesses de vent. Modéliser les profils de vitesse du vent permet de comprendre comment l'éolienne réagit à différentes vitesses et comment elle optimise sa production d'énergie.

c-Effets de Sol : Le vent peut être influencé par la topographie du terrain et les obstacles environnants, ce qui crée des variations locales du vent. La modélisation doit tenir compte de ces effets de sol, notamment le vent accéléré à proximité du sol.

d-Effets de Turbulence : La turbulence dans le vent peut avoir des effets importants sur le comportement de l'éolienne. Modéliser les variations de turbulence permet de mieux comprendre comment l'éolienne réagit aux fluctuations du vent.

e-Aérodynamique de l'Éolienne : L'aérodynamique de l'éolienne, y compris la forme des pales, influe sur la manière dont l'éolienne capte et convertit l'énergie du vent en énergie mécanique. La modélisation de ces aspects est cruciale pour évaluer les performances de l'éolienne.

f-Interaction Éolienne-Éolienne : Dans les parcs éoliens, les éoliennes peuvent créer des interférences mutuelles en raison de l'effet d'entraînement du vent. Modéliser ces interactions aide à optimiser la disposition des éoliennes pour maximiser leur efficacité.

g-Simulation Numérique : La modélisation de l'interférence du vent sur une éolienne implique souvent l'utilisation de simulations numériques basées sur la dynamique des fluides (CFD) et des logiciels de simulation spécifiques. Ces simulations permettent d'obtenir des informations détaillées sur le comportement de l'éolienne dans différentes conditions de vent.

Dans notre cas, nous avons simplifié la modélisation en utilisant un tableau de données V2G.WINDTURBINE.wind avec un profil de vitesse de vent prédéfini et sa relation avec la production d'énergie à travers l'éolienne. Voici une explication plus détaillée de notre modèle simplifié :

II 3.2 Modèle de la turbine éolienne

La représentation schématique de la turbine éolienne est présentée dans la Figure II-14. Les caractéristiques de la turbine éolienne sont déterminées par les courbes du coefficient de puissance (CP), qui dépendent du rapport de vitesse et de l'angle de calage des pales β (exprimé en degrés).

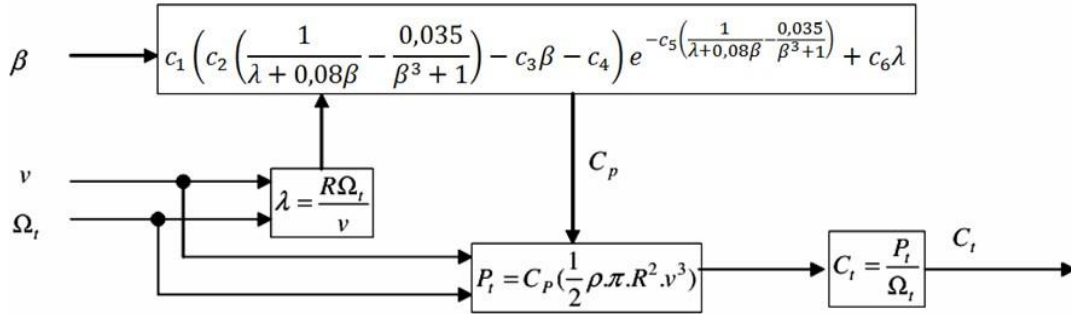


Figure II-14 : Configuration d'une éolienne

Où :

Ω_t = Vitesse angulaire mécanique (rad/s mécanique) de la turbine.

V_v = Vitesse du vent (m/s).

ρ = Densité de l'air 1.22 (kg /m³) à la pression atmosphérique à 15°C.

R = Rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

L'expression mathématique du coefficient de puissance C_p pour notre éolienne en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de calage des pales β (exprimé en degrés) est la suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \quad (\text{II.8})$$

Où $c_1, c_2,$

$c_3, c_4, c_5,$ et c_6 sont les paramètres spécifiques de votre modèle

II 3.3 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur sert de lien entre la turbine et le générateur. Pour notre modélisation, nous le considérons comme rigide et représenté par un simple facteur d'amplification. Toute élasticité et frottement du multiplicateur sont négligés, et aucune perte énergétique n'est prise en

compte. Le couple mécanique généré par la turbine éolienne est divisé par le facteur de multiplication pour obtenir le couple mécanique appliqué à l'arbre du générateur.

$$C_{mec} = G \cdot C_t \quad (II.9)$$

Où :

C_{mec} : Couple mécanique appliqué à l'arbre du générateur (N.m).

G : Facteur de multiplication (-).

Le multiplicateur ajuste la vitesse de rotation de la turbine pour qu'elle corresponde à celle du générateur, comme suit :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (II.10)$$

Où :

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (rad/s mécanique).

II 3.4 Modèle de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f_v \Omega_{mec} \quad (II.11)$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes (kg.m²).

$C_t = C_{mec} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne.

f_v : Coefficient de frottements visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique du générateur en (N.m)

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_{\text{Turbine}}}{g^2} + J_{\text{Générateur}} \quad (\text{II.12})$$

Où J_{Turbine} est l'inertie de la turbine et $J_{\text{Générateur}}$ est l'inertie du générateur.

II 3.5 Modélisation de l'actionneur des pales

Le mécanisme d'orientation des pales a pour objectif principal de limiter la puissance générée par l'éolienne. Ce système permet de faire pivoter les pales grâce à un dispositif de contrôle appelé "Pitch control"). En ajustant l'angle d'orientation des pales, il est possible de modifier les performances de l'éolienne, notamment le coefficient de puissance, comme illustré dans la figure II-15. Les pales sont positionnées face au vent à faible vitesse, mais à mesure que la vitesse du vent augmente, elles s'inclinent pour réduire le coefficient de puissance.

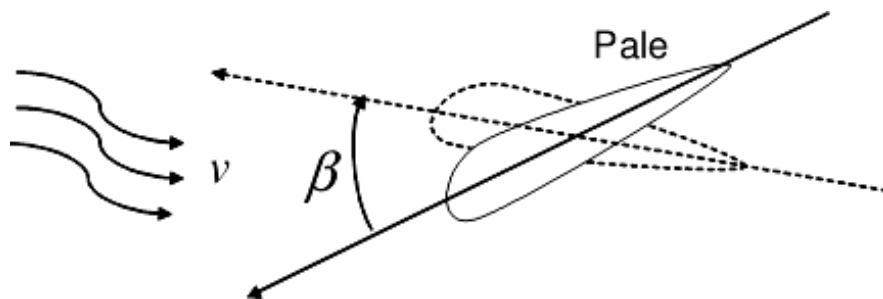


Figure II-15 : Orientation des pales

Le mécanisme de contrôle de l'angle d'orientation des pales est modélisé à l'aide d'une fonction de transfert de premier ordre. Cet actionneur fonctionne en mode boucle fermée pour réguler l'angle de calage des pales, représenté par β , tout en respectant des limites sur β . Pour une illustration visuelle, veuillez-vous référer à la figure II-16.

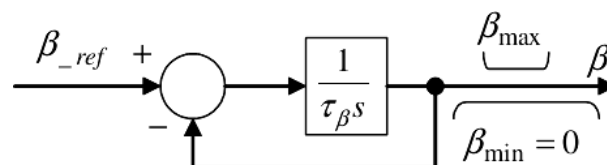


Figure II-16 : Modèle et commande du système de calage de pale

Où :

τ_β : Constante de temps de l'actionneur (s).

$\beta_{\min}, \beta_{\max}$: Limites de l'angle de calage des pales dépendant de la conception physique.

s : Opérateur de Laplace.

β_{ref} : Référence d'angle reçue du processus de la commande de la puissance électrique.

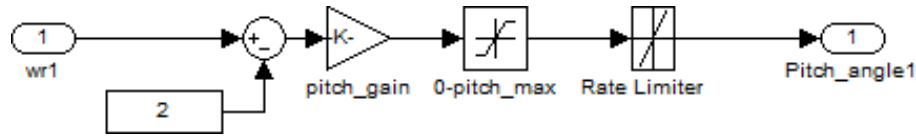


Figure II-17 : Modèle sous Simulink du système de calage de pale

II 3.5 Modélisation de la génératrice

a-Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)

La modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent repose sur les mêmes hypothèses que celles utilisées pour la machine asynchrone. L'expression des tensions des phases du stator de la machine est formulée par la relation suivante

Expression des tensions et flux statoriques :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_a][I_{abc}] + \frac{d[\Phi_{abc}]}{dt} \\ [\Phi_{abc}] = [L_{rr}][I_{abc}] + [\Phi_{abc}] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

L'application des transformations de Park fait aboutir aux équations des tensions du stator et des flux :

$$\begin{cases} V_d = R_a I_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_s \Phi_q \\ V_q = R_a I_q + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_d \\ \Phi_d = L_d I_d + \Phi_e \\ \Phi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

L_d, L_q : Respectivement les inductances directe et quadratique du stator.

V_d, V_q : Respectivement tension statoriques direct et quadratique.

I_d, I_q : Respectivement courant statoriques direct et quadratique.

Φ_d, Φ_q : Respectivement flux statoriques direct et quadratique.

En combinant les expressions (II.13) et (II.14) on aboutit à la représentation sous la forme d'équations d'état suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega L_q}{L_d} & -\frac{R_a}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{V_q - \omega \cdot \Phi_e}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

Le couple électromagnétique sera exprimé par :

$$C_{em} = P ((L_d - L_q) I_d + \Phi_e) I \quad (\text{II. 16})$$

Φ_e : Flux d'aimant permanent par pôle.

b-Commande PI standard

La stratégie de commande adopte une approche de contrôle proportionnel-intégral (PI) pour la régulation des courants.

Dans cette méthode, deux boucles de contrôle indépendantes sont mises en place pour les courants I_{sd} et I_{sq} . En utilisant des termes de découplage pour compenser les effets des perturbations connues, le système à plusieurs variables décrit par les équations statoriques est simplifié en deux systèmes indépendants à une seule variable. Cela facilite l'analyse des correcteurs de type PI.

Les sorties des correcteurs PI sont appliquées aux systèmes à une seule variable, permettant ainsi de générer les tensions de commande V_{csd} et V_{csq} pour les courants I_{sd} et I_{sq} , respectivement. La formulation exacte des équations pour V_{csd} et V_{csq} dépendra des caractéristiques spécifiques du contrôleur PI utilisé et des paramètres du système.

II 4. Modèle de Ferme Éolienne Simplifié :

Notre modèle de ferme éolienne simplifié se fonde sur une relation linéaire entre la vitesse nominale du vent et la puissance nominale générée par nos éoliennes. Nous avons choisi cette approche pour obtenir une estimation générale de la production d'énergie éolienne sans avoir recours à une modélisation complexe.

a-Relation Linéaire :

La relation linéaire que nous avons adoptée signifie que la puissance générée par notre ferme éolienne est proportionnelle à la vitesse du vent. En d'autres termes, lorsque la vitesse du vent augmente, la puissance générée par nos éoliennes augmente également, et vice versa.

b-Déclenchement en Cas de Vent Maximal :

Nous avons pris la précaution de déconnecter notre ferme éolienne du réseau électrique lorsque la vitesse du vent atteint la valeur maximale prédéfinie. Cette mesure de sécurité empêche nos éoliennes de fonctionner à des vitesses de vent potentiellement dangereuses voir Figure II-18.

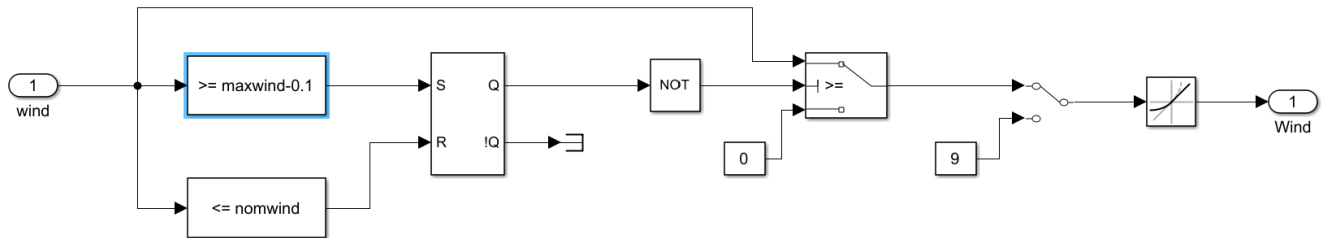


Figure II-18 : schéma de bloc de Déclenchement en Cas de Vent Maximal

Lorsque la vitesse du vent se situe entre la vitesse nominale et la vitesse maximale que nous avons définie, nous avons fixé la puissance générée à une valeur constante de 1 pu.

(Unité de puissance), correspondant à notre puissance nominale de 4.5.

c-Paramètres Nominiaux et Maximaux :

Dans notre modèle Figure II-19, les paramètres clés sont les suivants :

- Puissance Nominale : 4.5 pu.
- Vitesse Nominale : 13.5 (unité de vitesse prédéfinie)
- Vitesse Maximale : 15 (unité de vitesse prédéfinie)

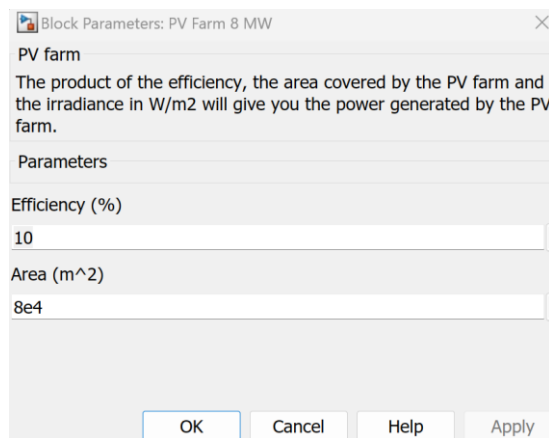


Figure II-19 : Bloc des Paramètres Nominiaux et Maximaux du fonctionnement de l'éolienne

En utilisant ce modèle simplifié que nous avons développé, nous sommes en mesure d'estimer la production d'énergie éolienne en fonction de la vitesse du vent au sein de la plage que nous avons spécifiée. Cette approche nous permet d'avoir une idée générale de la manière dont notre production

D'énergie varie en fonction des différentes vitesses du vent, tout en évitant la complexité de modèles plus détaillés. Cependant, il est important de noter que notre modèle pourrait ne pas capturer tous les aspects complexes de l'interaction entre le vent et nos éoliennes.

II 4.1. Bloc de Puissance éolienne (Wind Power) :

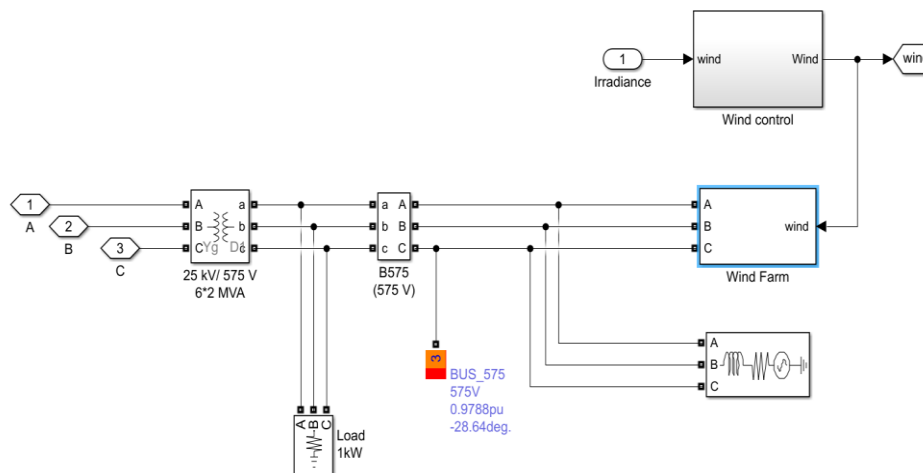


Figure II-20 : Schéma général du bloc Wind Power utilisé pour simuler la production d'énergie électrique par notre ferme d'éolienne en réponse aux conditions météorologiques de vitesse du vent

Notre système Figure II-20 utilise des données de vitesse de vent prédéfinies pour modéliser la production d'énergie avec une ferme éolienne.

II .4.2 Vitesse de vent

Notre modèle a pour objectif d'étudier l'effet de la variation de la vitesse du vent sur la production d'énergie électrique en utilisant les données prédéfinies de vitesses de vent du tableau `V2G.WINDTURBINE` . `wind` dans le bloc Figure II-21 sur une période de 24 heures. Cette simulation nous permettra de comprendre comment les différentes vitesses du vent affectent la production d'énergie dans notre ferme éolienne tout au long de la journée.

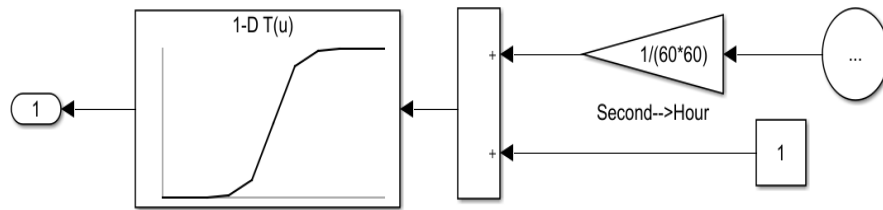


Figure II-21 : de modélisation du profile de vitesse de vent sur Matlab Simulink

La puissance électrique P générée par la turbine d'éolienne est directement proportionnelle à l'interférence du changement de la vitesse du vent Mathématiquement, cela peut être exprimé comme :

$$P=0.5 \times \text{Air Density} \times \text{Rotor Area} \times \text{Coefficient of Power} \times V^3 \quad (\text{II.16})$$

Où :

P est la puissance générée par l'éolienne (en watts ou mégawatts),

Air Density est la densité de l'air (en kg/m^3),

Rotor Area est la surface balayée par le rotor de l'éolienne (en m^2),

$\text{Coefficient of Power}$ est le coefficient de puissance dépendant du design de l'éolienne et du rendement,

V est la vitesse du vent (en m/s).

Ceci est une simplification générale et la vraie relation entre la vitesse du vent et la puissance générée peut être plus complexe en tenant compte des caractéristiques de l'éolienne, des pertes et d'autres facteurs.

II 4.3 Modèle simplifié du module wind farm (Convert wind Power farm from the Data block to Simscape Power Systems Currents)

Notre bloc utilise une source de courant équivalente. Le courant produit est ajusté par le signal d'entrée du bloc.

Nous avons la possibilité d'amorcer notre circuit avec un courant continu (CC) ou alternatif (CA) spécifique. Pour commencer la simulation en régime permanent, l'entrée du bloc doit être reliée à un signal qui débute sous forme d'onde sinusoïdale ou continue correspondant aux valeurs initiales, sans modélisation des composants spécifiques de l'éolienne.

Ce bloc est utile pour fournir un courant contrôlé dans un circuit électrique. Vous pouvez spécifier la valeur du courant que vous désirez fournir ou le modèle du comportement du courant par rapport au temps et à la vitesse du vent.

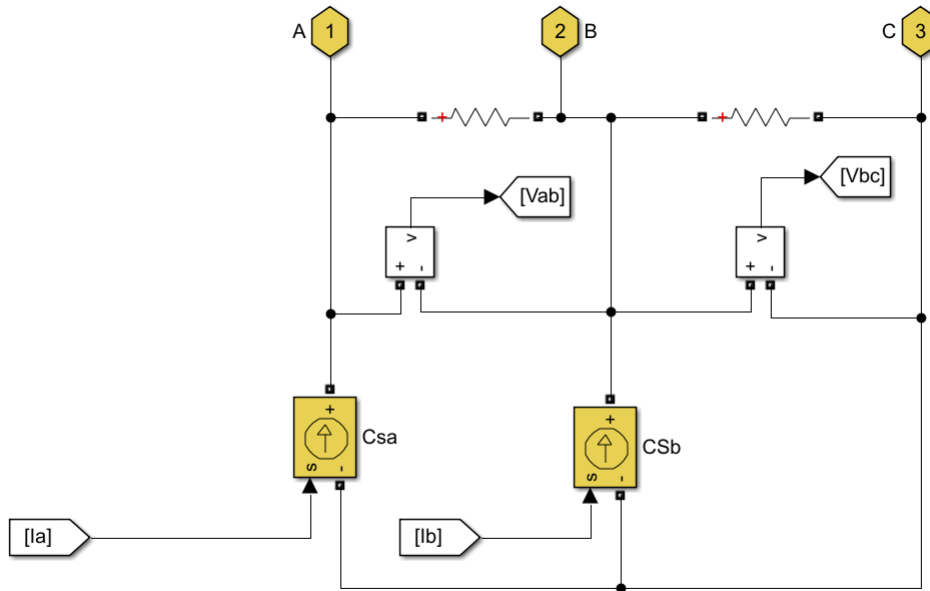


Figure II-22 de la Puissance de la ferme d'éolienne à partir du bloc de Données convertis en Courants dans Simscape Power Systems

a-CSA ou CBA (Controlled Current Source A or B) :

Ce bloc Figure II-22 peut être utilisé pour fournir un courant contrôlé dans un circuit électrique. Vous pouvez spécifier la valeur du courant que vous souhaitez fournir ou le modèle de comportement du courant en fonction du temps, la vitesse du vent

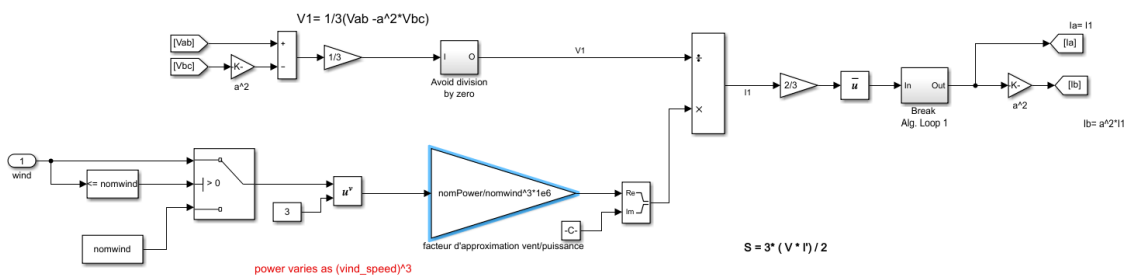


Figure II-23 : représente la relation mathématique qui est généré dans le bloc wind power farm pour fournir une source de courent contrôlé

Le facteur d'approximation entre la vitesse du vent et la puissance éolienne peut être exprimé par les équations suivantes :

$$V1 = \frac{3}{1} (V_{ab} - (a^2) \cdot V_{bc}) \quad (\text{II.17})$$

$$S = 3 \cdot (V \cdot I') / 2 \quad (\text{II.18})$$

$V1$ est le facteur d'approximation entre la vitesse du vent et la puissance éolienne.

V_{ab} et V_{bc} sont des tensions spécifiques.

a est un coefficient.

S représente la puissance.

V est la vitesse du vent.

I' est le courant.

De plus, vous pouvez calculer le courant i_b comme suit :

$$i_b = (a^2) \cdot i_1 \quad (\text{II.19})$$

Où le courant i_b et i_a sont les courants dans le système Controlled Current Source A and B.

II.5 Modélisation du Groupe Diesel :

Le groupe diesel peut être simplifié en utilisant un modèle de premier ordre basé sur la relation entre le couple mécanique et l'indice du système de pompe à carburant. Ce modèle simplifié permet de comprendre le comportement global du groupe diesel de manière plus concise.

Ce modèle se caractérise par deux éléments principaux :

a-Gain Statique : Le modèle considère un gain statique qui représente comment le couple mécanique varie en réponse à un changement d'indice de la pompe à carburant. En d'autres termes, il mesure comment le couple produit par le moteur diesel change lorsque l'indice de la pompe à carburant est modifié.

b-Constante de Temps : Le modèle intègre une constante de temps qui indique à quelle vitesse le couple mécanique réagit aux changements dans l'indice de la pompe à carburant. Plus précisément, cela montre combien de temps il faut pour que le couple mécanique atteigne environ 63,2 % de sa valeur finale en réponse à un changement de l'indice.

De plus, dans la réalité, il existe un décalage ou un retard entre deux explosions successives dans le moteur diesel. Ce décalage introduit un léger retard dans les mesures pratiques du

système. Cela signifie que le temps nécessaire pour que le système réagisse réellement aux changements est un peu plus long en raison de cet intervalle entre les explosions.

En résumé, en simplifiant le groupe diesel en utilisant un modèle de premier ordre, on prend en compte le lien entre le couple mécanique et l'indice du système de pompe à carburant. Ce modèle simplifié permet de comprendre les changements de couple en fonction des variations de l'indice, tout en prenant en compte le retard observé dans les mesures pratiques.

II .5.1 La modélisation de la partie mécanique d'un groupe diesel

Le modèle Figure II-24 de la partie mécanique du groupe diesel décrit la dynamique et le comportement de la partie mécanique d'un système de groupe diesel. Ce modèle inclut divers composants et paramètres qui contribuent au fonctionnement global du groupe diesel. Voici une description plus détaillée du modèle de la partie mécanique :

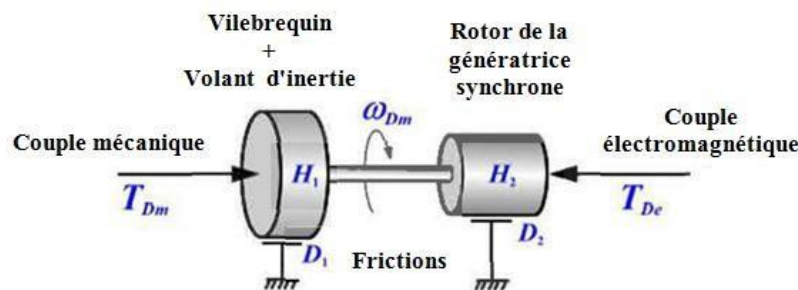


Figure II-24 : Modèle de la partie mécanique du groupe diesel

a-Variables Internes : Le modèle utilise des variables internes pour représenter différents paramètres et grandeurs internes du système mécanique. Ces variables peuvent inclure des éléments tels que les taux de changement de vitesse ou d'autres propriétés dynamiques.

b-Couple Moteur Mesuré ($x_2(t)$) : Cette variable représente le couple moteur mesuré qui résulte de la combustion du carburant dans les cylindres du moteur diesel. Il s'agit de la force de rotation générée par le moteur et qui alimente le reste du système mécanique.

c-Partie Rotative : La partie rotative du groupe diesel comprend des composants tels que le vilebrequin, le volant d'inertie et le rotor de la génératrice synchrone. Ces éléments sont responsables de la conversion de l'énergie mécanique générée par le moteur en énergie électrique.

d-Couple Électromagnétique (TDe) : Le couple électromagnétique TDe est généré lorsque le générateur diesel est connecté à une charge électrique. Ce couple s'oppose au mouvement de la partie rotative et est lié à la production d'énergie électrique.

e-Inertie et Forces de Friction : Chaque composant en rotation possède une inertie qui dépend de sa masse. Les forces de friction, principalement causées par les frottements des pistons dans

les cylindres du moteur, influencent la dynamique du système. Les effets de friction sont pris en compte pour modéliser la décélération due au frottement.

f-Inertie Totale et Coefficient de Friction Total : L'inertie totale (HD) est la somme des inerties individuelles des composants en rotation. Le coefficient de friction total (DD) est la somme des coefficients de friction de chaque composant. Ces grandeurs normalisées (p.u.) décrivent l'effet cumulatif de l'inertie et du frottement sur le système.

g-Vitesse de Rotation (ω_{ref}) : Cette variable représente la vitesse de rotation de la partie mécanique. Elle peut être liée à la vitesse du moteur ou à la vitesse de rotation du générateur diesel.

h-Puissance Apparente de Référence (S_{ref}) : La puissance apparente de référence représente un niveau de puissance standard pour le système mécanique du groupe diesel.

Le modèle de la partie mécanique du groupe diesel vise à capturer les interactions et les dynamiques entre les différents composants mécaniques impliqués dans la conversion d'énergie du moteur diesel en énergie électrique. Il utilise des équations et des relations pour représenter ces phénomènes physiques et peut être utilisé pour analyser les performances et les comportements du groupe diesel dans différentes conditions de fonctionnement.

II 5.2 Le régulateur de vitesse

le modèle du système du moteur diesel et du régulateur. Ce système a pour objectif de contrôler la vitesse et la puissance de sortie d'un moteur diesel. Il implique un régulateur, un actionneur et un moteur.

Voici une explication des composants que vous avez décrits :

a-Fonction de Transfert du Régulateur (H_c) : Le régulateur est chargé d'ajuster la puissance mécanique de sortie du moteur en fonction de la différence entre les vitesses souhaitée et réelle. La fonction de transfert du régulateur est donnée par :

$$H_c = K * (1 + T_3 * s) / (1 + T_1 * s + T_1 * T_2 * s^2) \quad (\text{II.20})$$

Ici, S représente la variable de Laplace, et K1 ,T1, T2 ,T3 sont des constantes qui déterminent le comportement du régulateur.

b-Fonction de Transfert de l'Actionneur (H_a) : L'actionneur est le composant qui ajuste physiquement la puissance de sortie du moteur en fonction du signal de contrôle du régulateur. La fonction de transfert de l'actionneur est donnée par :

$$H_a = (1 + T_4 * s) / [s * (1 + T_5 * s) * (1 + T_6 * s)] \quad (\text{II.21})$$

Les constantes T4 et T5 affectent la réponse de l'actionneur.

c-Retard de Temps du Moteur (Td) : Le moteur introduit un retard de temps "td " dans le système. Les retards de temps peuvent survenir en raison de processus physiques ou de délais de communication.

L'objectif global de ce système est de réguler la vitesse du moteur diesel en ajustant la puissance mécanique de sortie du moteur. Le régulateur calcule l'ajustement de puissance nécessaire en fonction de la différence entre les vitesses souhaitée et réelle. L'actionneur ajuste physiquement la puissance de sortie, et le moteur introduit un retard de temps dans le système.

Pour implémenter ce système dans MATLAB Simulink, vous devrez créer des blocs Figure II-25 représentant le régulateur, l'actionneur et le moteur, et les connecter de manière appropriée. Les paramètres K, T1, T2, T3, T4, T5, T6 et Td seront définis en fonction des caractéristiques spécifiques du système de moteur diesel et de régulateur que vous modélisez.

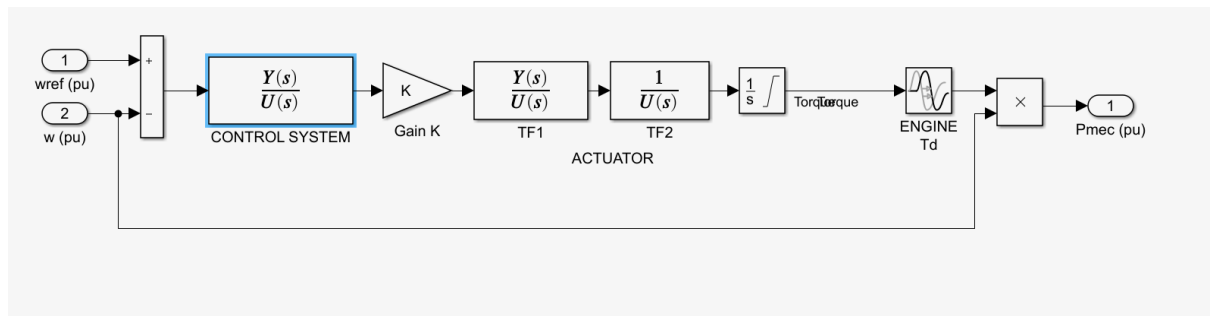


Figure II-25: Modèle Simulink du régulateur de vitesse du moteur diesel

II 5.3 Le Régulateur de Tension de la Machine Synchrone et l'Excitatrice

Cette partie du modèle Figure II-26 permet de réguler la tension d'une machine synchrone de type 1 IEEE en utilisant une excitatrice. La sortie de ce système est la tension de champ vfd (en unités par unité) qui doit être appliquée à l'entrée Vf d'un bloc Machine Synchrone. Les signaux de mesures Vd et Vq du bloc Machine Synchrone sont utilisés comme entrées pour le bloc du Système d'Excitation.

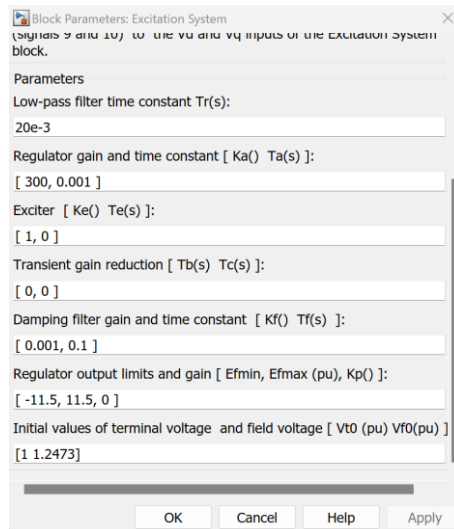


Figure II-26 block Régulateur de Tension de la Machine Synchronne et l'Excitatrice

Pour expliquer plus en détail, voici comment cela fonctionne :

a-Régulation de la Tension de la Machine Synchronne : Une machine synchronne est utilisée pour générer de l'électricité avec une tension constante et une fréquence synchronisée. Cependant, en fonction des charges et des conditions du réseau, la tension de sortie de la machine peut varier. Le régulateur de tension surveille cette tension et ajuste le champ magnétique de la machine pour maintenir la tension à un niveau souhaité.

b-Excitatrice : L'excitatrice est le composant qui contrôle le champ magnétique de la machine synchronne. Elle génère la tension de champ (v_{fd}) en fonction des signaux de contrôle qu'elle reçoit. L'objectif est d'ajuster le champ magnétique pour que la machine produise la tension de sortie désirée.

c-Connexion avec le Bloc Machine Synchronne : Le bloc Machine Synchronne simule le comportement de la machine électrique. Il mesure les tensions V_d (axe direct) et V_q (axe en quadrature) de la machine. Ces mesures sont importantes pour le contrôle de l'excitatrice. Les signaux V_d et V_q sont utilisés comme entrées pour le bloc Système d'Excitation.

d-Sortie du Système : L'excitatrice calcule la tension de champ v_{fd} en utilisant les signaux V_d et V_q du bloc Machine Synchronne et d'autres signaux de commande internes. La tension v_{fd} est ensuite envoyée à l'entrée V_f du bloc Machine Synchronne. Cela permet de contrôler le champ magnétique et, par conséquent, la tension de sortie de la machine.

En résumé, cette partie du modèle vise à assurer que la machine synchronne maintient une tension de sortie stable en ajustant son champ magnétique à l'aide de l'excitatrice. Les signaux V_d et V_q du bloc Machine Synchronne sont utilisés pour informer l'excitatrice des besoins de réglage.

II 5.4 Modèle simplifié de la machine synchrone

La puissance mécanique produite par le bloc "moteur diesel" est convertie en puissance électrique par le modèle simplifié de la machine synchrone. Le bloc représente à la fois les aspects mécaniques et électriques de la machine. Le rotor de la machine synchrone est composé d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu I_e , créant un champ magnétique polaire $2p$. Il comporte donc p paires de pôles, tout comme le stator. Les enroulements du stator sont traversés par des courants alternatifs triphasés. La relation entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est définie par :

$$GD2 = \frac{z(s)}{\omega_{Dm}^{ref}(s) - \omega_{Dm}(s)} = K_{DP} \frac{s + K_{DI}}{s + K_{DP}K_{DI}K_{Dr}} \quad (II.22)$$

Avec $\omega_g = 2\pi f$, où f est la fréquence des courants alternatifs en Hz.

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K' \Phi n_s \quad (II.23)$$

où :

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement [Wb]

n_s : Vitesse de rotation [tr/mn]

$K' = KNp$: Constante globale (caractéristique de la machine)

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est montré dans la figure II-27 :

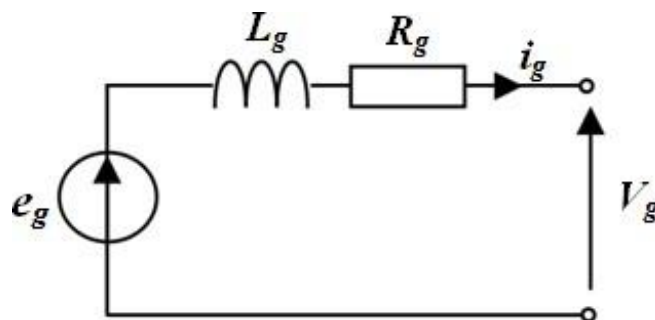


Figure II-27 : Modèle équivalent d'un enroulement

e_g : f.é.m. à vide [V]

v_g : tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V]

R_g : résistance de l'enroulement [Ω]

L_g : inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la figure II-30 avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = v_g + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g \tag{II.24}$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices

$e_{g1}(t), e_{g2}(t)$ et $e_{g3}(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrite par l'équation :

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em-g} \tag{II.25}$$

où :

J_{ds} : Inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone

Ω_s : Vitesse de rotation ;

T_d : Couple mécanique sur l'arbre ;

T_{em-g} : Couple électromagnétique.

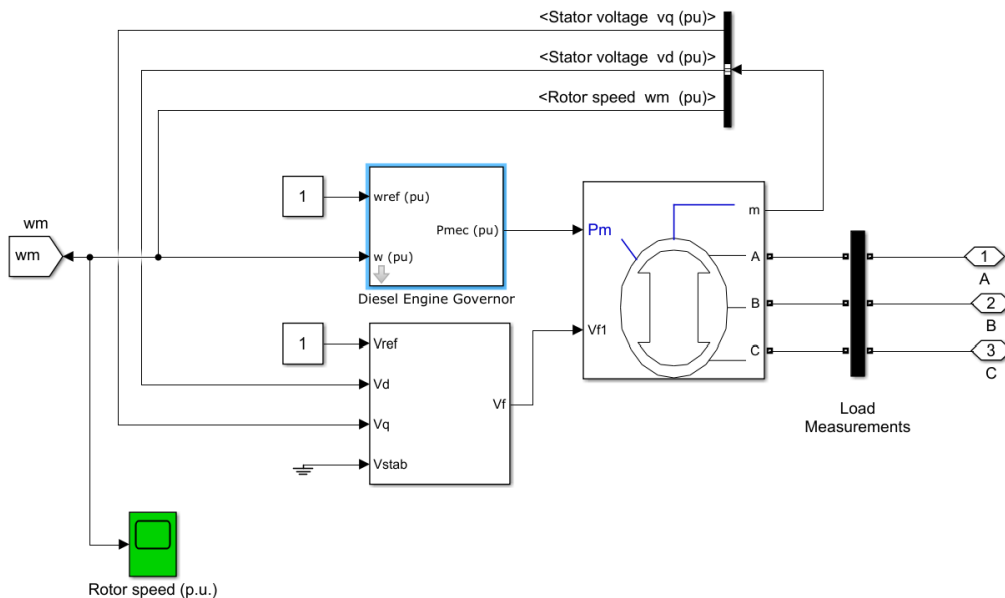


Figure II-28 : Modèle Simulink du groupe diesel

II.6 Modélisation de la charge alimentée par notre system PVED

La charge dans ce contexte se compose de plusieurs éléments qui consomment de l'énergie électrique dans le system hybride PVED simulée. Voici les principaux composants de la charge :

II 6.1 Charge résidentielle

Cette charge Figure II-29 représente les divers appareils électriques que l'on trouve généralement dans une maison, tels que les lumières, les appareils de cuisine, les appareils électroniques, le chauffage, la climatisation, etc. La consommation d'énergie de la charge résidentielle suit un schéma typique de consommation domestique, avec des variations tout au long de la journée. Donnée dans un tableau de consommation prédéfinie V2G.CONSUMPTION

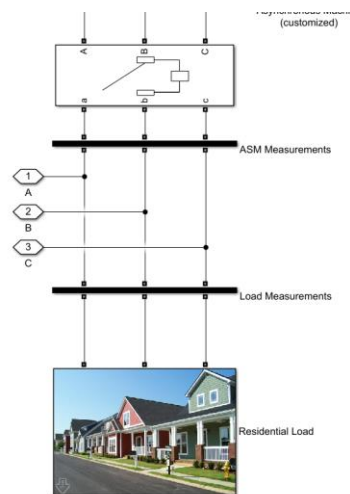


Figure II-29 : La modélisation de la charge résidentielle

II 6.2 Machine asynchrone (charge inductive) :

Cette composante simule l'impact d'une charge inductive industrielle, comme un système de ventilation, sur le system hybride PVED. Les charges inductives ont la particularité de générer un déphasage entre le courant et la tension, ce qui peut affecter la stabilité du réseau électrique.

Le démarrage de la machine asynchrone au début de la troisième heure pourrait avoir été choisi pour représenter une situation réaliste où une charge industrielle inductive, comme un système de ventilation, démarre pendant la journée. Voir les paramètres de bloc dans la Figure II-30 .

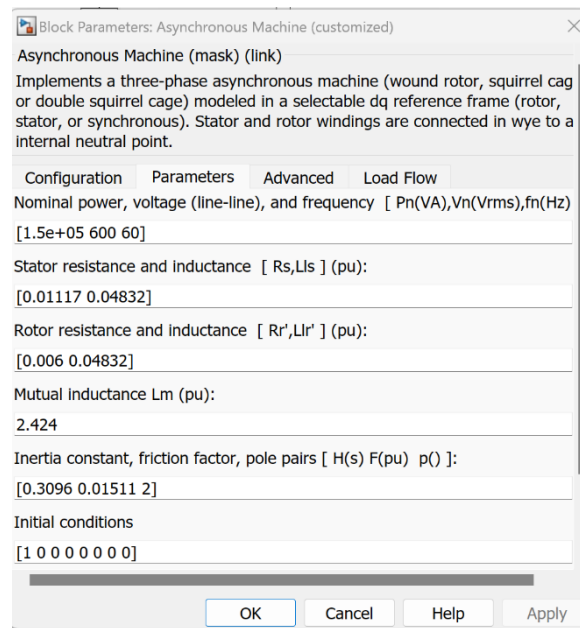


Figure II-30 : Bloc de configuration des paramètres de la machine asynchrone

II 6.3 Véhicules électriques (V2G)

Les profils d'utilisateurs de véhicules électriques font également partie de la charge. Les voitures électriques se rechargent lorsqu'elles sont branchées à la station de recharge V2G. Elles peuvent contribuer à la charge en absorbant de l'énergie du réseau ou injecter de l'énergie dans le réseau si elles sont connectées au V2G et qu'il y a un excès d'énergie disponible.

a-Fonctions du V2G (Véhicule-à-Réseau)

Contrôle de la Charge des Batteries, la technologie V2G gère le processus de chargement des batteries des véhicules électriques connectés. Elle peut contrôler quand et à quelle vitesse les véhicules sont chargés. Cette fonction est essentielle pour optimiser l'utilisation de l'énergie disponible et éviter les surcharges du réseau pendant les périodes de demande maximale.

Régulation du Réseau : Lorsque des événements réseau, tels que des changements soudains de demande ou d'approvisionnement en énergie, se produisent au cours de la journée (comme mentionné dans la description précédente), la technologie V2G peut utiliser l'énergie stockée dans les batteries des véhicules pour aider à stabiliser le system hybride PVED. En puisant de l'énergie des véhicules ou en la fournissant au réseau, le V2G peut contribuer à maintenir la stabilité du réseau.

b-Profiles des Utilisateurs de Voitures

Profil #1 : Les personnes qui se rendent au travail et ont la possibilité de charger leurs voitures sur leur lieu de travail. Ce profil pourrait utiliser la recharge sur le lieu de travail pour minimiser la charge sur le system hybride PVED

Profil #2 : Similaire au Profil #1, mais le trajet est plus long. Ce profil pourrait nécessiter une gestion de la recharge plus avancée en raison de la distance de conduite étendue.

Profil #3 : Les personnes qui se rendent au travail mais n'ont pas la possibilité de charger au travail. Ces utilisateurs pourraient dépendre uniquement de la recharge à domicile, ce qui pourrait impacter la charge dans le system hybride PVED pendant les heures de pointe.

Profil #4 : Les individus qui restent à la maison, ce qui entraîne probablement une demande moindre en matière de recharge et d'utilisation d'énergie pendant les heures de travail typiques.

Profil #5 : Les personnes travaillant en horaires de nuit. Leurs schémas de recharge et d'utilisation d'énergie pourraient différer de ceux ayant des horaires de jour.

Chaque profil introduit un ensemble différent de défis et d'opportunités pour la gestion de la consommation d'énergie, des schémas de recharge et de la stabilité du réseau au sein du system hybride PVED. En mettant en œuvre ces profils et en explorant leurs interactions avec les divers éléments du system hybride PVED, la simulation peut fournir des insights sur des stratégies efficaces de gestion de l'énergie et de régulation du réseau dans différents scénarios

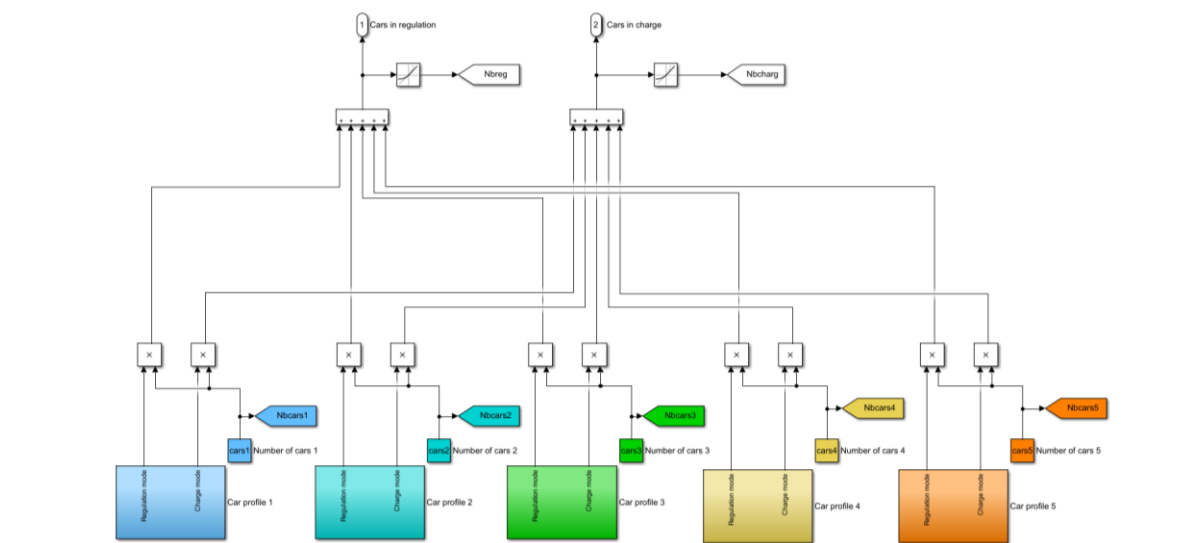


Figure II-31 : la modélisation des Profils des Utilisateurs de Voitures

Ces composantes sont regroupées pour représenter dans la Figure II-31 qui donnent la demande totale en énergie électrique dans le system hybride PVED simulée. La gestion de cette charge est essentielle pour maintenir l'équilibre entre la production d'énergie renouvelable (solaire et éolienne) et la demande, ainsi que pour répondre aux événements perturbateurs tout en maintenant la stabilité du réseau électrique.

II.7 Simulation du système PVED sous Matlab-Simulink :

La simulation joue un rôle essentiel pour passer de la conception théorique à la réalisation pratique d'un système avec une plus grande confiance. Dans le cadre de ce projet, des simulations sont réalisées à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink pour les systèmes de production d'énergie photovoltaïque, éolienne et diesel. Ces simulations sont effectuées en prenant en compte de nombreuses variations des conditions atmosphériques. Les scénarios de simulation englobent des situations diverses et représentatives des difficultés potentielles rencontrées dans les systèmes multi-sources. L'objectif principal est d'étudier le comportement dynamique de ces systèmes face aux variations climatiques telles que le vent, l'éclairement solaire et la température. Cela permet d'évaluer l'efficacité des stratégies de commande visant à optimiser le rendement énergétique des sources d'énergie renouvelable.

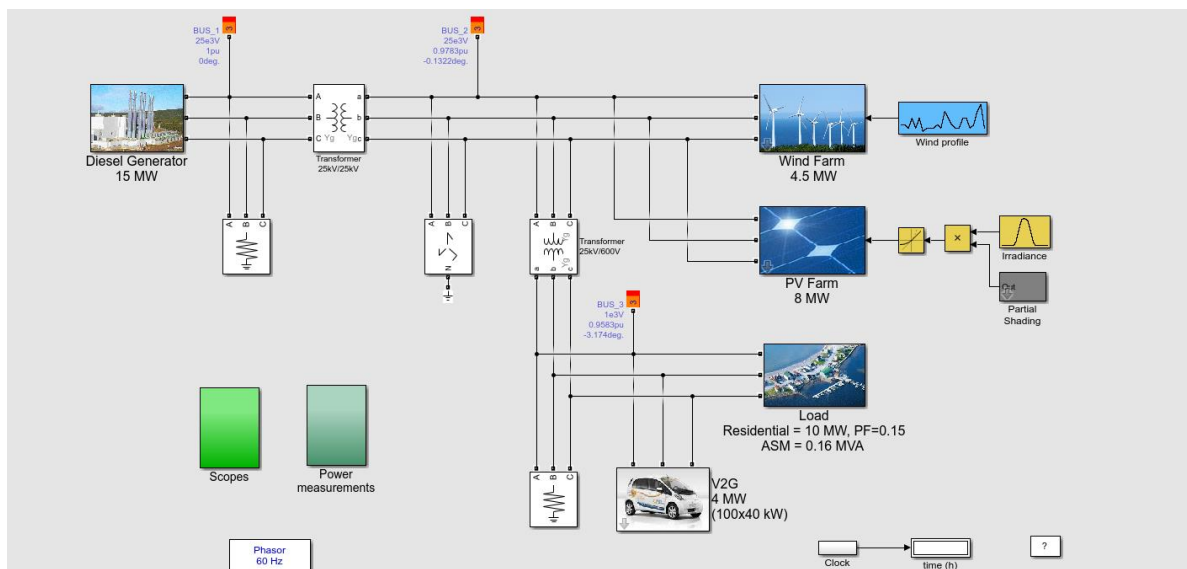


Figure II-32 : Modèle Simulink d'un système multi-sources PVED

II .8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation des composants d'un système multi-sources PVED Figure II-32 afin d'étudier et simuler le comportement de ce système suite à l'intégration de sources d'énergie renouvelable dans un système de production conventionnel basé sur des sources classiques telles que les groupes diesel. Nous avons constaté que les sources renouvelables injectent l'intégralité de leur puissance produite, tandis que les groupes diesel assurent la compensation de la différence entre la puissance des générateurs photovoltaïques et éoliens et le reste de la charge. À cet effet, les groupes diesel, également appelés centrales diesel, fonctionnent en mode isochrone, tandis que la puissance produite par les sources renouvelables dépend uniquement des paramètres météorologiques.

Références bibliographiques

- [1] **D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA**, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°4, 2008.
- [2] **D. LU**, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [3] **M. SONAM et G. MANJU**, « Modeling & simulation of a photovoltaic energy system », *Trans Stellar, International Journal of Electrical and Electronics*, Vol. 3, Issue 1, 61-66, 2013.
- [4] **W. M. ANTHONY**, « modeling and analysis of a photovoltaic system with a distributed energy storage system », Thèse de doctorat, San Luis Obispo Faculty of California Polytechnic State University, 2012.
- [5] **R. KHEZZAR, M. ZEREG et A. KHEZZAR**, « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°3, 2010.
- [6] **A. CHOUDER et al**, « Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters », *Simulation Modelling Practice and Theory ELSEVIER* 20, 46–58, 2012.
- [7] **Y. TIAN et al**, « Modified Asymmetrical Variable Step Size Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Systems », *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 156-164, 2014.
- [8] **S. VIGHETTI**, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [9] **H. YINGLEI et al**, « Research on Testing Technology of High-power Photovoltaic Arrays », *Revue des Energies Renouvelables* Vol.14 N°2 (2011) 219 – 228, 2011.
- [10] **A. MIRECKI**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [11] **N. ABU-TABAK**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.

- [12] **N. KHEZAMI**, « Commande multi-modèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [13] **M. Belatel et al**, « Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte », Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1, 2011.
- [14] **B. FELLAH**, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2012.
- [15] **A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm** « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/Eolien/Diesel) », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2, 2007.
- [16] **A. OULD MAHMOUD**, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixte » thèse de doctorat de Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2008.
- [17] **M. BELHADJ**, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007.
- [18] **C. WANG**, « Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems » thèse de doctorat de Montana State University, 2006.
- [19] **L. ZAROOR**, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [20] **T. A. THEUBOU TAMEGHE**, « Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale », Thèse de doctorat, Université du Québec, 2012.
- [21] **LAROUÏ Rachid**, « Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar », Thèse Mémoire de Magister, Université Ahmed Draya Adrar, 2015.

Chapitre 3 :

Simulation et résultat d'analyse d'un système d'énergie multi-source PV-E-D

3 Introduction et les l'objectifs de l'analyse des résultats de la simulation

L'analyse des résultats de la simulation joue un rôle crucial dans la compréhension approfondie du comportement du système énergétique étudié. Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les données recueillies à partir de la simulation du micro-réseau comprenant un générateur diesel, une ferme photovoltaïque, une ferme éolienne, un système de véhicule à réseau (V2G) et des charges résidentielles. L'objectif principal de cette analyse est de décortiquer les interactions complexes entre les différentes composantes du système et d'apporter des éclaircissements sur la manière dont elles influencent la production, la consommation et la stabilité du réseau.

Au cours de cette analyse, nous examinerons les variations de puissance générée et consommée, les réponses aux fluctuations de la vitesse du vent et de l'irradiance solaire, ainsi que les effets du système V2G sur la gestion de la demande. Nous explorerons également l'impact des charges résidentielles et des moteurs asynchrones sur les courbes de charge, ainsi que les événements qui peuvent perturber la fréquence du réseau. Grâce à cette exploration, nous visons à mettre en évidence les relations complexes entre les différentes composantes du micro-réseau et à fournir des informations précieuses pour une meilleure gestion et optimisation de ce système énergétique.

En somme, cette analyse approfondie nous permettra de tirer des conclusions éclairées sur le comportement global du micro-réseau, d'identifier les points forts et les défis, et d'ouvrir la voie à de nouvelles perspectives d'amélioration et d'optimisation. En suivant cette démarche, nous pourrons mieux appréhender les performances du système et prendre des décisions informées pour son développement futur.

3.1 Contexte de la simulation

La simulation s'inscrit dans un contexte de micro-réseau énergétique, visant à analyser en profondeur les interactions et les performances des différentes sources d'énergie et des charges au sein d'un système intégré. Ce micro-réseau est conçu pour représenter une communauté de près de 1000 foyers, en tenant compte des énergies renouvelables et des véhicules électriques, dans une perspective d'avenir réaliste.

Les principales composantes du system Hybride PVED étudié sont les suivantes :

a-Générateur Diesel

Le générateur diesel joue le rôle de générateur de puissance de base, équilibrant la demande et la production d'énergie. Il est également chargé de maintenir la fréquence du réseau stable en surveillant la vitesse de rotation de sa machine synchrone.

b-Ferme Photovoltaïque (PV)

La ferme PV exploite l'énergie solaire pour générer de l'électricité. La puissance produite dépend de facteurs tels que la surface des panneaux, leur efficacité et l'irradiance solaire.

c-Ferme Éolienne :

La ferme éolienne utilise le vent pour produire de l'électricité. La puissance générée est liée à la vitesse du vent, et elle est maximale à une certaine vitesse, au-delà de laquelle la ferme est déconnectée du réseau.

d-Système Véhicule à Grid (V2G) :

Ce système exploite les véhicules électriques pour moduler la demande en énergie. Il peut

charger ou décharger les batteries des véhicules en fonction des besoins du réseau. Il propose cinq profils d'utilisation différents :

Profil #1 : Personnes allant travailler avec possibilité de charger leur voiture au travail.

Profil #2 : Personnes allant travailler avec possibilité de charger leur voiture au travail, mais avec un trajet plus long.

Profil #3 : Personnes allant travailler sans possibilité de charger leur voiture au travail.

Profil #4 : Personnes restant à domicile.

Profil #5 : Personnes travaillant en horaires de nuit.

e-Charges Résidentielles :

Les charges résidentielles englobent les besoins énergétiques des ménages. Elles comprennent également une charge asynchrone, simulant l'impact d'une charge inductive industrielle (comme un système de ventilation) sur le micro-réseau. Les profils de consommation suivent une distribution typique des foyers, avec un facteur de puissance donné.

Le scénario de simulation s'étend sur une durée de 24 heures. L'intensité solaire suit une distribution normale, atteignant son maximum au milieu de la journée. La vitesse du vent varie considérablement au cours de la journée, avec des pics et des creux. La consommation Résidentielle suit une tendance typique, atteignant un pic en soirée et diminuant progressivement pendant la nuit. Trois événements impactent la fréquence du réseau pendant la journée :

Le démarrage de la machine asynchrone au début de la troisième heure.

L'ombrage partiel à midi affectant la production d'énergie solaire.

La déconnexion de la ferme éolienne à 22h lorsque la vitesse du vent dépasse la limite autorisée.

3.1.1 Explication des paramètres de simulation et des conditions initiales

Dans le cadre de la simulation, plusieurs paramètres et conditions initiales ont été définis pour caractériser le fonctionnement du système hybride PVED et reproduire au mieux les conditions réelles. Voici une explication détaillée de ces paramètres et conditions initiales :

a-Puissance Nominale et Capacité des Sources :

Les puissances nominales des différentes sources d'énergie ont été spécifiées, notamment celle du générateur diesel (15 MW), de la ferme photovoltaïque (8 MW) et de la ferme éolienne (4,5 MW). Ces valeurs représentent les niveaux de production standard dans des conditions idéales.

b-Charges Résidentielles et Industrielles :

Les charges résidentielles et industrielles ont été prises en compte dans la simulation. Les charges résidentielles, d'une capacité totale de 10 MW avec un facteur de puissance de 0,15, ont été modélisées pour simuler la demande d'énergie dans une communauté de 1000 maisons. De plus, une charge industrielle sous forme d'une machine asynchrone (ASM) d'une capacité de 0,16 MVA a été ajoutée pour représenter l'impact des charges industrielles sur le micro-réseau.

c-Profil de Charge V2G :

Les profils de charge des véhicules électriques (V2G) ont été définis en fonction de cinq scénarios différents : trajet domicile-travail avec possibilité de charge au travail, trajet domicile-travail avec trajet plus long, trajet domicile-travail sans possibilité de charge au travail, personnes restant à la maison et personnes travaillant en horaire de nuit. Ces profils déterminent comment les véhicules électriques interagissent avec le réseau en fonction de leurs besoins de

charge et de décharge.

d-Variations de Vitesse du Vent et Irradiance Solaire :

Les données l'irradiance solaire à partir du tableau V2G.IRRADIANCE.SUN ont été utilisées pour simuler les variations naturelles de l'ensoleillement tout au long de la journée voire
Tableau III-01

<u>Time laps of the Day</u>	<u>Mesure of irradiation data</u>
	<u>G</u>
00H00	0
01H00	0
02H00	0
03H00	0
04H00	0
05H00	0
06H00	0.050
07H00	3
08H00	69
09H00	236
10H00	392
11H00	507
12H00	526
13H00	513
14H00	471
15H00	346
16H00	179
17H00	40
18H00	0.667
19H00	0
20H00	0
21H00	0
22H00	0
23H00	0
24H00	0

Tableau III-01 : mesure de l'irradiation du soleil durant différent horaire de la journée

Le profil de vitesse du vent Figure III-01 est crucial car il détermine la quantité d'énergie produite par les éoliennes. Les données de vitesse et de direction du vent et historiques dan le tableau V2G.WINDTURBINE.wind sont utilisées pour créer un modèle réaliste de la

variabilité du vent au fil du temps. Ces données influencent directement la production d'énergie de la ferme éolienne

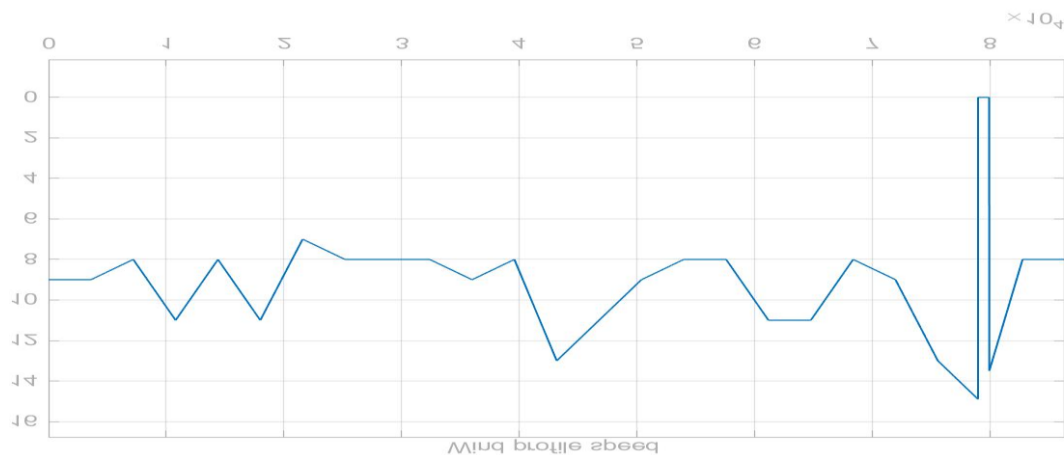


Figure III-01 : variation de la vitesse de vent au cours de la journée

<u>Time laps of the Day</u>	<u>Wind speed</u>
00H00	8
01H00	9
02H00	9
03H00	8
04H00	11
05H00	8
06H00	11
07H00	7
08H00	8
09H00	8
10H00	8
11H00	9
12H00	8
13H00	13
14H00	11
15H00	9
16H00	8
17H00	8
18H00	11
19H00	11
20H00	8
21H00	9
22H00	13
23H00	15
24H00	8

Tableau III-01 : mesure de vitesse de vent durant différent horaire de la journée

3.1.2 Scénarios de Simulation :

La simulation s'étend sur une période de 24 heures, ce qui permet d'observer les variations de la production et de la consommation d'énergie sur une journée complète. Les scénarios incluent des événements tels que le démarrage de la machine asynchrone, la présence de nuages réduisant l'irradiance solaire et le déclenchement de la ferme éolienne lorsque la vitesse du vent dépasse les limites maximales.

En utilisant ces paramètres et conditions initiales, la simulation permet de modéliser de manière réaliste le comportement du système hybride PVED et d'analyser son fonctionnement en réponse aux variations des différentes sources d'énergie et des charges.

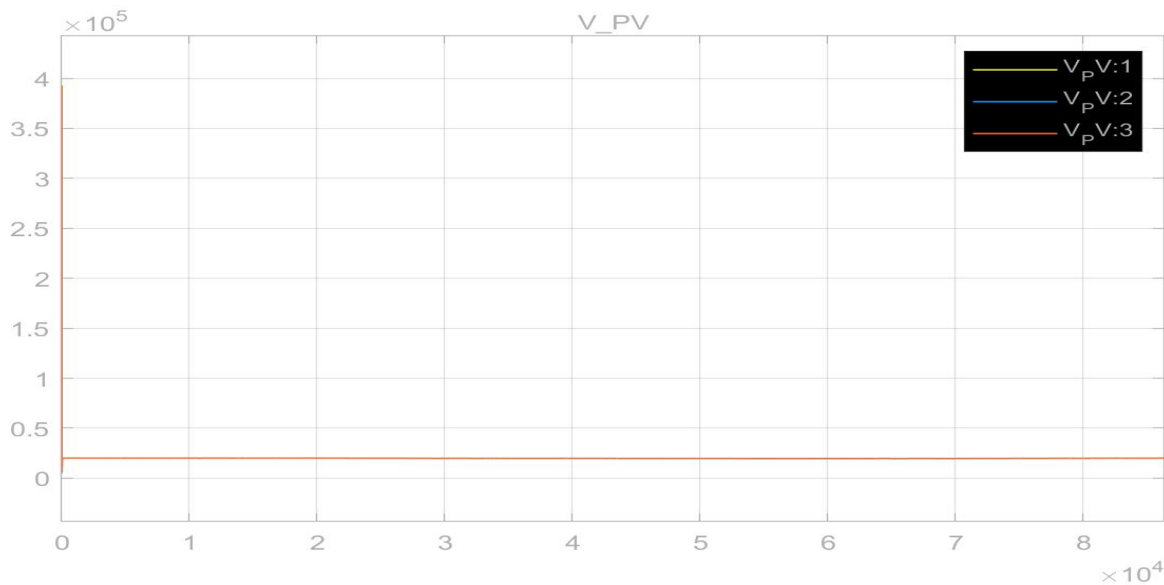


Figure III-02 : résultats de la tension de production de la ferme photovoltaïque

3.2 Simulation de la ferme photovoltaïque

Notre analyse de la réaction de la ferme photovoltaïque (PV) aux variations d'irradiance solaire est très approfondie et pertinente pour comprendre le fonctionnement de ce type de système énergétique. on prend en compte divers aspects clés qui affectent la production d'énergie solaire et soulignent l'importance de chaque élément.

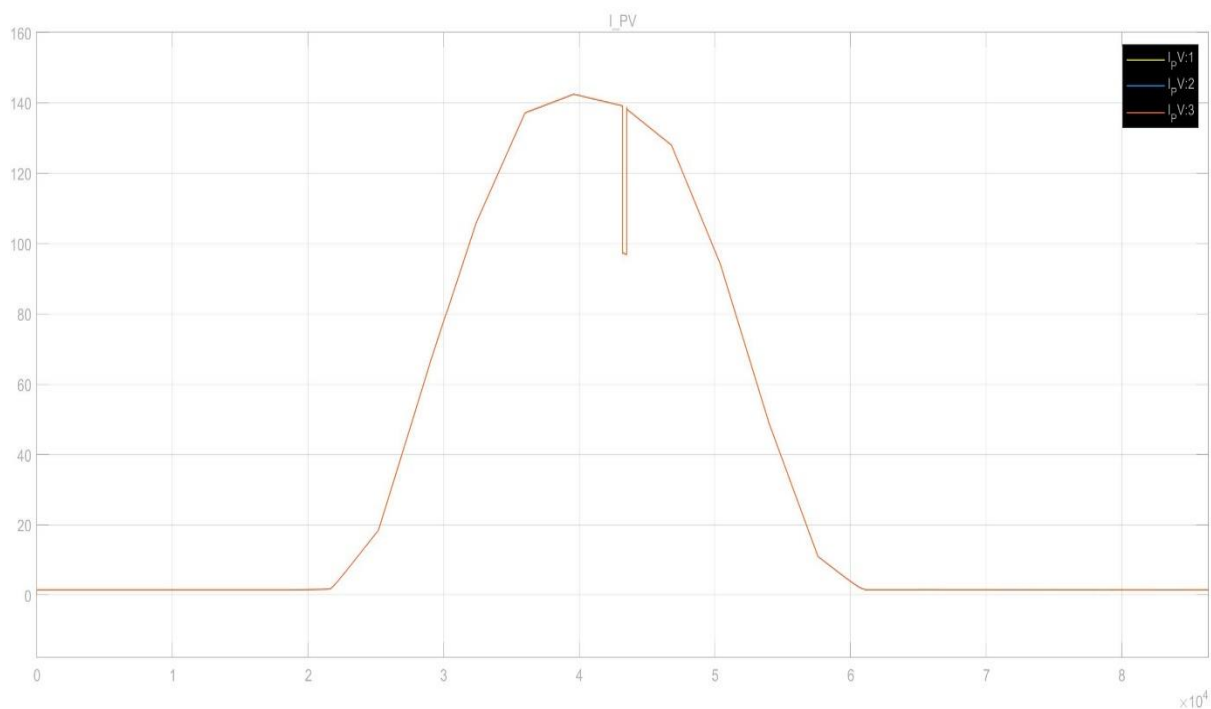


Figure III-03 : résultats de la courant de production de la ferme photovoltaïque

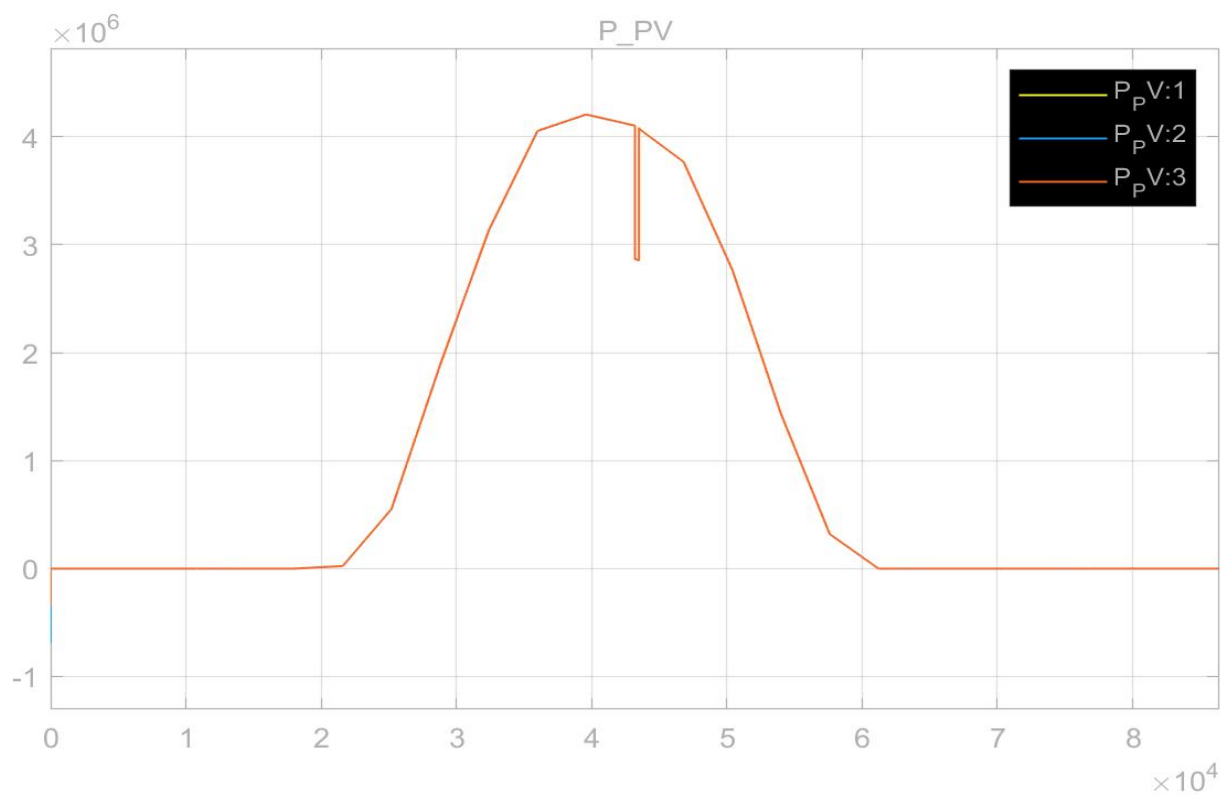


Figure III-04 : résultats de la puissance active de production de la ferme photovoltaïque

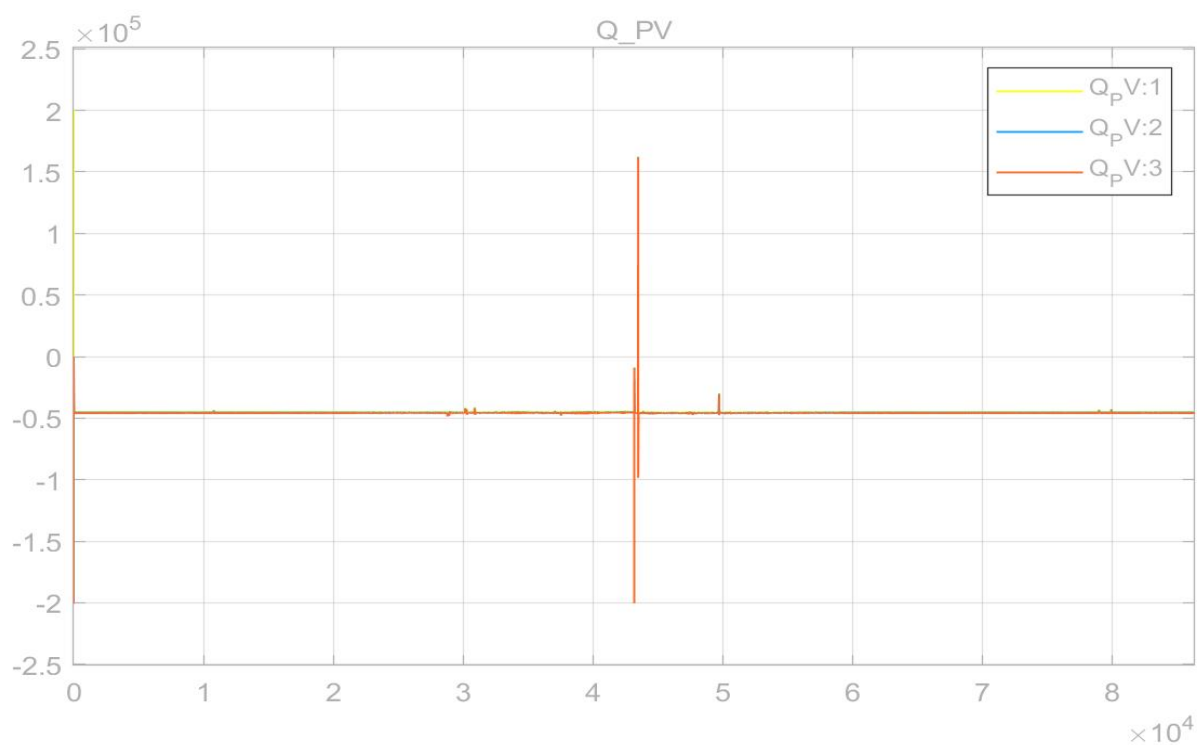


Figure III-05 : résultats de la puissance réactive de production de la ferme photovoltaïque

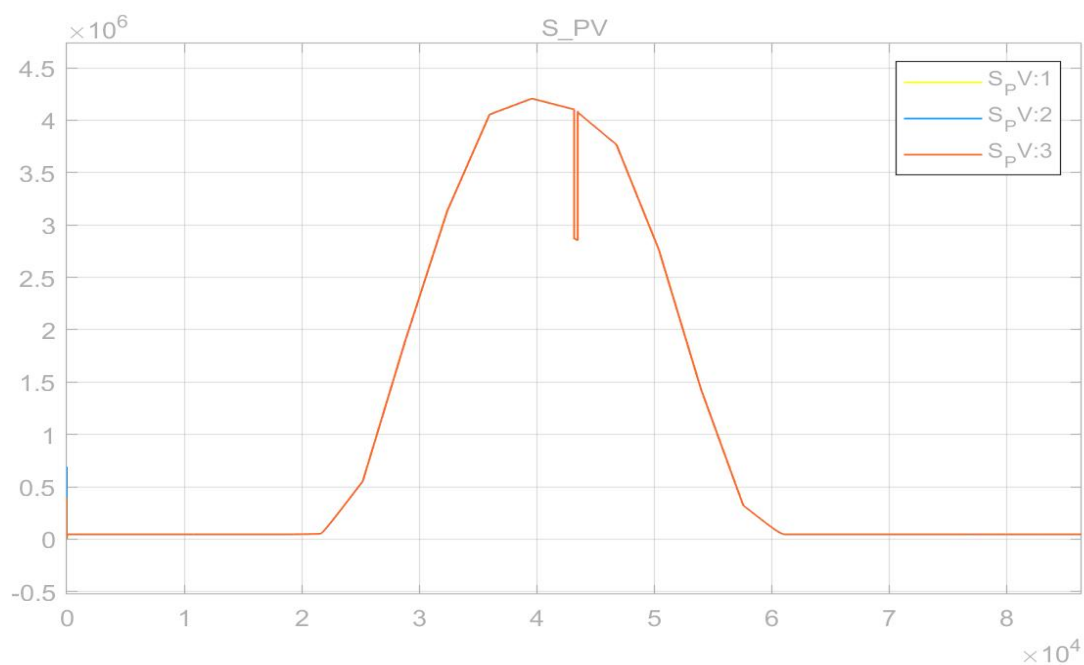


Figure III-06 : résultats de la puissance totale de production de la ferme

3.2.1 analyses des résultats et commentaire

a-Variations d'irradiance solaire :

Voici un résumé des points clés que vous avez abordé :

On observe comment la production d'énergie solaire varie en fonction de l'intensité lumineuse captée par les panneaux solaires. Vous identifiez les pics de production d'énergie pendant les périodes d'irradiance élevée et les chutes de production lorsqu'il y a une réduction de l'irradiance due à des nuages ou d'autres facteurs.

b-Relation directe entre irradiation et production d'énergie :

On met en évidence la relation directe entre l'irradiation solaire et la production d'énergie. Cela démontre comment la disponibilité de la lumière solaire influe directement sur la production d'énergie dans le système.

c-Absence de production en l'absence d'irradiation :

On souligne l'importance de l'absence de production d'énergie lorsque l'irradiation solaire est nulle. Cela montre que la production d'énergie est complètement dépendante de la lumière solaire.

d-Fluctuations associées au courant :

On observe les fluctuations naturelles de la lumière solaire au fil de la journée, ce qui se traduit par des variations dans les niveaux de puissance active, réactive et apparente.

e-Effet de l'ombrage :

On reconnaît l'impact significatif de l'ombrage, qu'il soit causé par des obstacles physiques tels que les bâtiments ou par des nuages passagers. Vous montrez comment ces zones d'ombre entraînent des baisses temporaires de la production d'énergie solaire.

Il est intéressant de noter que malgré la stabilité de la tension du réseau, les variations dans le courant et la puissance réactive et active sont observées tout au long des 24 heures en fonction de la variation de l'irradiance solaire. En particulier, il y a des perturbations de la production d'énergie pendant certaines périodes, en raison de l'effet d'ombrage partiel, qui est représenté par un facteur de 0.7 à midi (12h00) et dure pendant 5 minutes. Cela peut être expliqué de la manière suivante :

f-Stabilité de la tension du réseau :

La tension du réseau électrique reste relativement stable pendant la journée, car elle est régulée et surveillée pour maintenir la qualité de l'électricité fournie aux consommateurs.

i-Variations dans le courant et la puissance :

Les variations dans le courant et la puissance réactive et active sont principalement dues aux fluctuations naturelles de l'irradiance solaire. Lorsque l'irradiance augmente, les panneaux solaires captent plus de lumière et génèrent plus d'énergie électrique, ce qui se traduit par une augmentation du courant et de la puissance active. De même, la puissance réactive peut également varier en fonction de la charge du système et de la réactivité des composants.

j-Effet de l'ombrage partiel :

L'effet d'ombrage partiel a un impact significatif sur la production d'énergie solaire pendant la journée. Lorsque le facteur d'ombrage est de 0.7 à midi (12h00), cela signifie que seulement 70 % de l'irradiance normale est atteint pendant cette période. Cela peut être causé par des objets ou des nuages qui passent partiellement devant les panneaux solaires, réduisant ainsi la quantité de lumière solaire captée et, par conséquent, la production d'énergie.

k-Perturbations de production :

Pendant les 5 minutes où l'effet d'ombrage partiel est en cours, la production d'énergie solaire sera temporairement réduite en raison de la diminution de l'irradiance. Une fois que l'ombrage est levé, la production d'énergie devrait revenir à des niveaux normaux en fonction de l'irradiance disponible.

Il est essentiel de prendre en compte ces variations et perturbations dans la gestion et la conception des systèmes d'énergie solaire. L'optimisation de la disposition des panneaux solaires, la surveillance en temps réel de la production et la prise en compte des facteurs météorologiques sont autant d'aspects importants pour garantir une performance maximale et stable de la ferme photovoltaïque malgré les conditions changeantes.

3.3 Simulation de la Ferme Éolienne :

Une simulation d'une ferme éolienne implique de modéliser le comportement de plusieurs éoliennes dans un environnement donné, en tenant compte de la vitesse du vent, des caractéristiques des éoliennes et des contraintes du réseau électrique. Voici comment une simulation et ses résultats pourraient être présentés

3.3.1 Modèles d'Éoliennes :

Les caractéristiques techniques des éoliennes, fournies par les fabricants, jouent un rôle crucial dans la description du comportement de ces installations dans les simulations. Les courbes de puissance en fonction de la vitesse du vent illustrent la manière dont la production d'une

éolienne varie en réponse aux variations de la vitesse du vent. Les seuils de démarrage et d'arrêt précisent les vitesses minimales et maximales du vent nécessaires pour lancer et arrêter le fonctionnement de l'éolienne. Les capacités nominales délimitent la puissance maximale qu'une éolienne peut produire lorsque soumise à sa vitesse nominale du vent. La réactivité fait référence à la vitesse à laquelle une éolienne peut ajuster sa production en réaction aux fluctuations de la vitesse du vent. Dans votre cas, la puissance nominale de l'éolienne est de 4.5 mégawatts (MW), correspondant à une vitesse de vent nominale de 13.5 mètres par seconde (m/s). L'éolienne est arrêtée lorsque le vent atteint une vitesse de 15 m/s, considérée comme sa vitesse maximale.

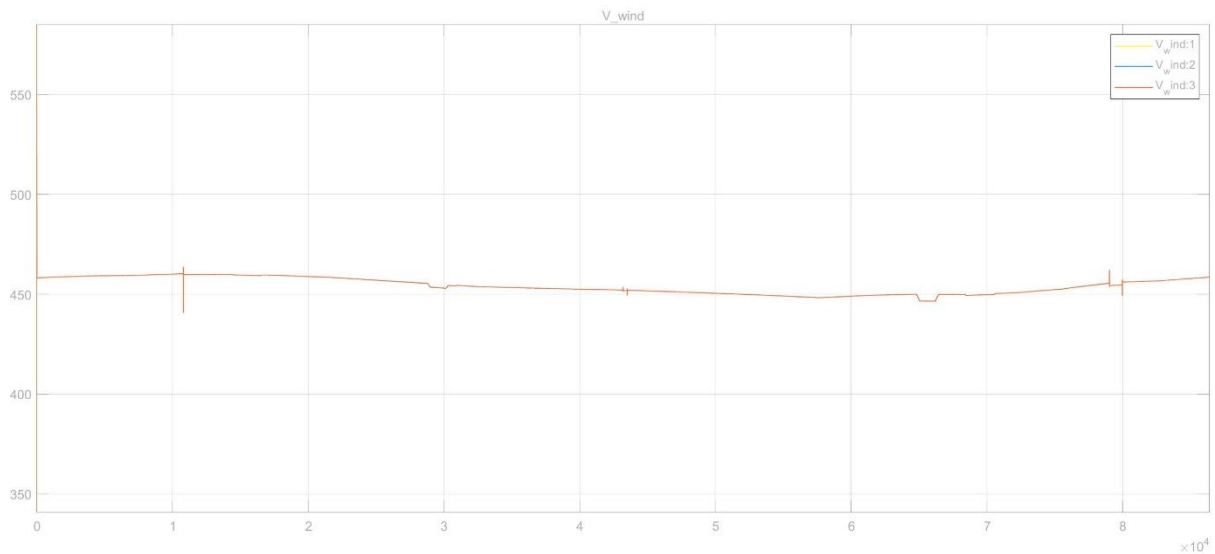


Figure III-07 : résultats de tension de production de l'éolienne

Ces informations sont essentielles pour modéliser précisément le comportement de l'éolienne dans une simulation, en prenant en compte sa réaction aux différentes conditions de vent et en respectant ses seuils de démarrage, d'arrêt et ses capacités nominales.

3.3.2 Stratégies de Contrôle :

Les éoliennes doivent être gérées pour assurer la stabilité du réseau et optimiser la production d'énergie. Les seuils de démarrage et d'arrêt déterminent quand les éoliennes commencent à produire de l'énergie et quand elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. Les stratégies de régulation de puissance permettent aux éoliennes de réagir aux fluctuations de la vitesse du vent tout en maintenant la stabilité du réseau. La gestion de la fréquence implique que les éoliennes ajustent leur production pour maintenir la fréquence du réseau dans des limites acceptables.

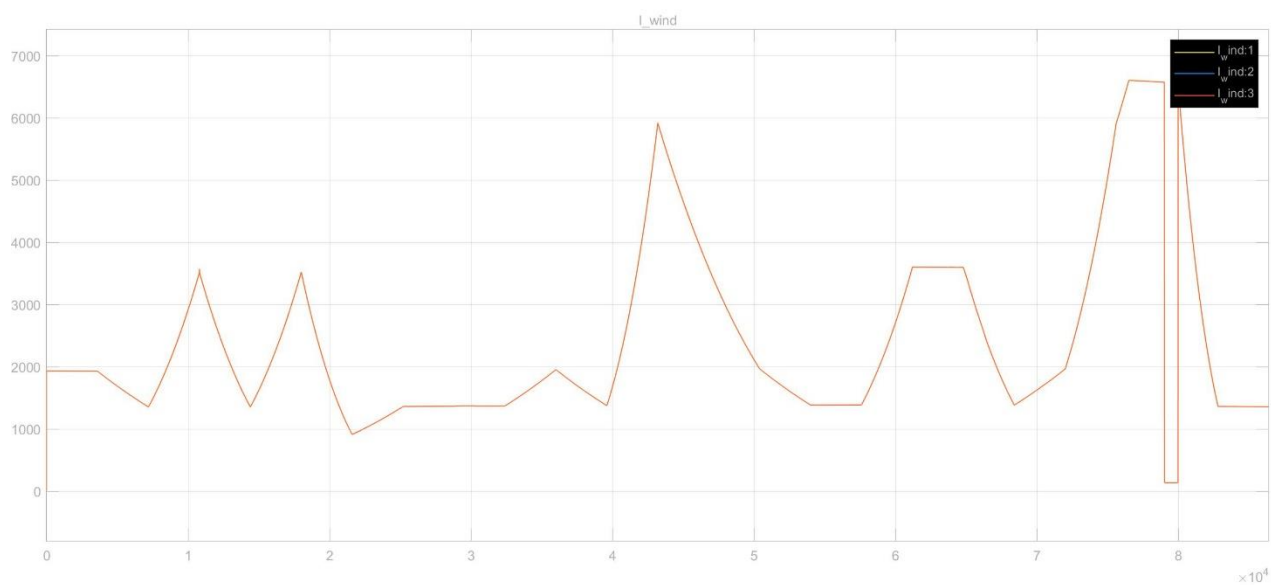


Figure III-08 : résultats de la courant de production de l'éolienne

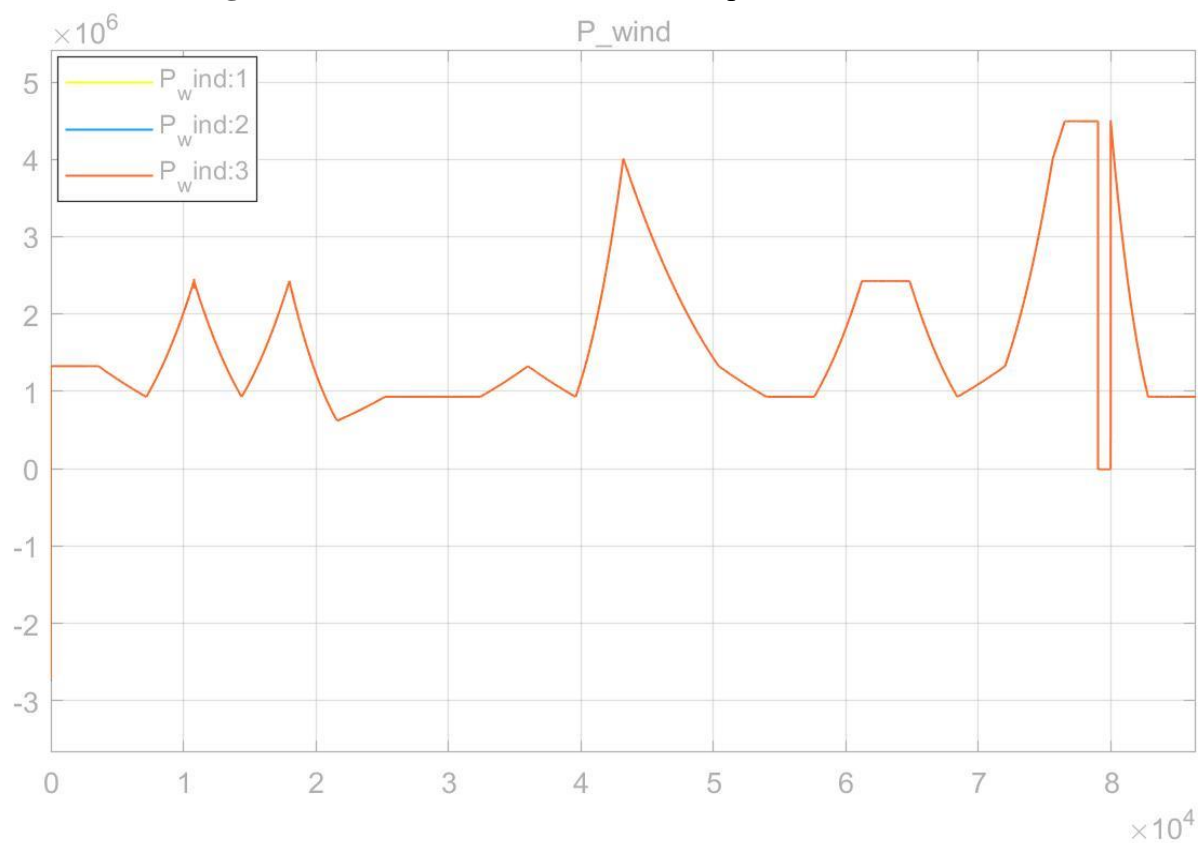


Figure III-09 : résultats de puissance active de production de l'éolienne

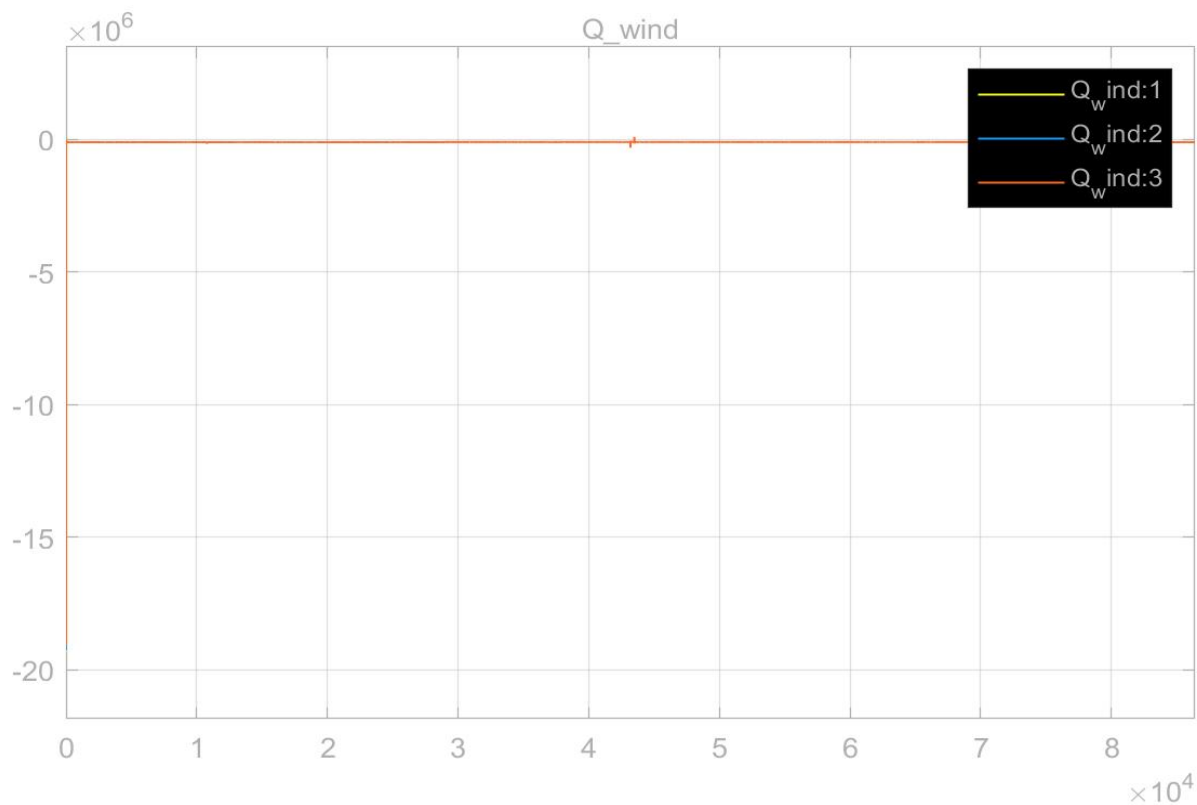


Figure III-10 : résultats de puissance réactive de production de l'éolienne

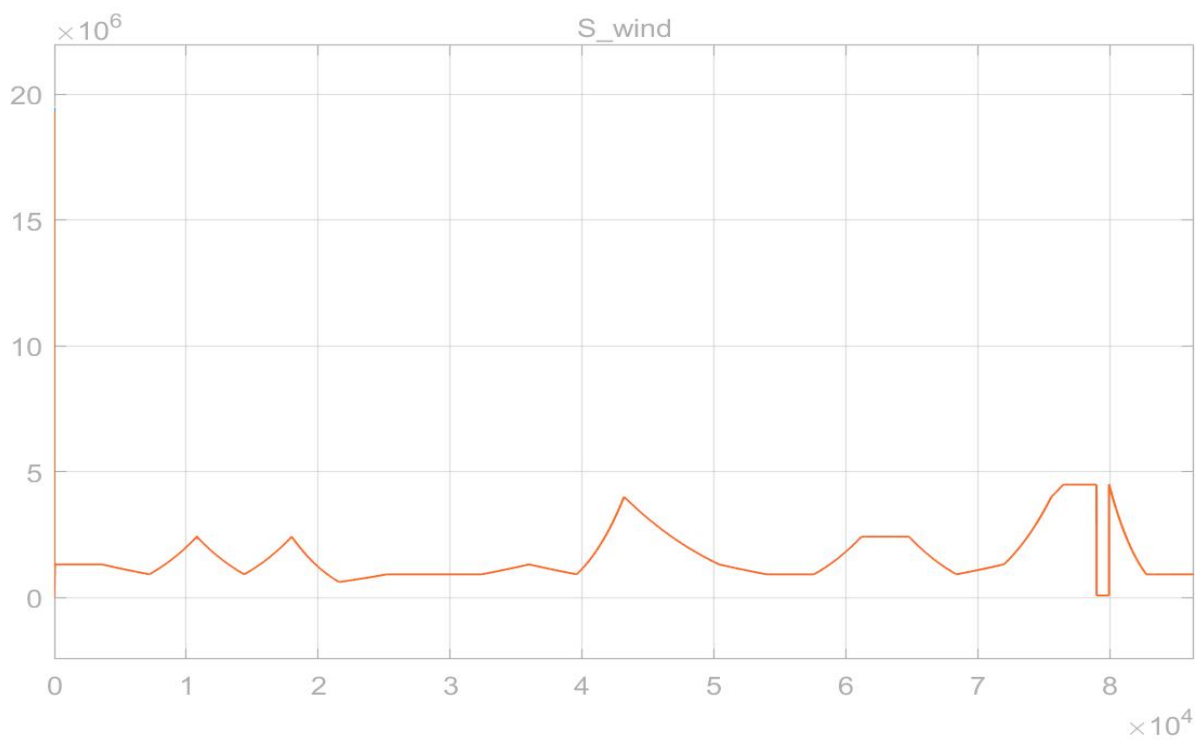


Figure III-11 : résultats de puissance totale de production de l'éolienne

3.3.3L'analyse des résultats de la simulation de la ferme éolienne :

Examinez comment la puissance active et réactive générée par la ferme éolienne varie en fonction de la vitesse du vent. Identifiez les seuils de démarrage et d'arrêt des éoliennes, ainsi que les plages de vitesse du vent dans lesquelles la puissance active et réactive sont maximales. Comparez également les courbes de puissance active et réactive pour différentes éoliennes de la ferme.

a-Réponse aux Changements de Vent :

Observez comment la ferme éolienne réagit aux variations soudaines de la vitesse du vent. Analysez les délais de réponse et les taux de changement de puissance active et réactive en fonction des changements de vent. Identifiez les éventuelles limitations ou retards dans la réponse.

b-Régulation de la Tension :

Étudiez comment la ferme éolienne contribue à la régulation de la tension dans le réseau électrique. Analysez comment la tension varie en fonction de la production d'énergie éolienne et de la charge du réseau. Identifiez les mécanismes de régulation de la tension intégrés dans les éoliennes et comment ils agissent pour maintenir la stabilité du réseau.

c-Effets des Perturbations du Réseau :

Introduisez des perturbations dans le réseau électrique simulé, telles que des variations de charge ou des courts-circuits, et observez comment la ferme éolienne réagit. Analysez les changements de puissance active, réactive et les variations de tension en réponse à ces perturbations.

On résume les informations fournies. Voici les remarques :

Pendant la période de 24 heures, la tension du réseau électrique demeure stable. Cependant, le courant et la puissance réactive et active varient en fonction des changements de la vitesse du vent. Une observation importante est l'augmentation de la production d'énergie pendant certaines heures où la vitesse du vent est élevée, notamment dans l'intervalle [4 5] Cela se traduit par un pic de production d'énergie.

Il est noté que la ferme éolienne se déconnecte automatiquement à 22 heures lorsque la vitesse du vent dépasse la limite prédéfinie. La puissance nominale de l'éolienne est de 4.5 mégawatts (MW), correspondant à une vitesse de vent nominale de 13.5 mètres par seconde (m/s). L'éolienne est conçue pour s'arrêter lorsque le vent atteint une vitesse de 15 m/s, qui est considérée comme la vitesse maximale sécurisée.

Ces informations soulignent l'importance de la modélisation précise des caractéristiques techniques des éoliennes, notamment leurs courbes de puissance en fonction de la vitesse du vent et leurs seuils de fonctionnement. Elles décrivent comment la production d'énergie éolienne est influencée par les conditions météorologiques, en mettant en évidence les moments de pic de production et les mesures de sécurité prises pour éviter tout dommage à l'éolienne lorsque le vent atteint des niveaux extrêmes.

3.4 Simulation du Générateur Diesel :

Le générateur diesel joue plusieurs rôles essentiels dans un système hybride PVED (Photovoltaïque, Éolien, Diesel) en garantissant la stabilité de l'alimentation électrique :

a-Fourniture d'Énergie de Secours

Lorsque la production d'énergie à partir des sources renouvelables (panneaux solaires et éoliennes) est insuffisante en raison de conditions météorologiques défavorables ou de la nuit, le générateur diesel entre en action pour fournir de l'énergie de secours. Cela garantit que la charge résidentielle et d'autres charges critiques restent alimentées sans interruption.

b-Équilibrage de la Production et de la Consommation

Le générateur diesel intervient pour équilibrer la production et la consommation d'énergie. Lorsque la demande d'électricité est élevée ou que les sources renouvelables ne peuvent pas répondre à la charge, le générateur diesel augmente sa production pour éviter les pénuries d'énergie.

c-Soutien au Réseau

Le générateur diesel peut également jouer un rôle dans la régulation de la tension et de la fréquence du réseau électrique, contribuant ainsi à la stabilité générale du réseau.

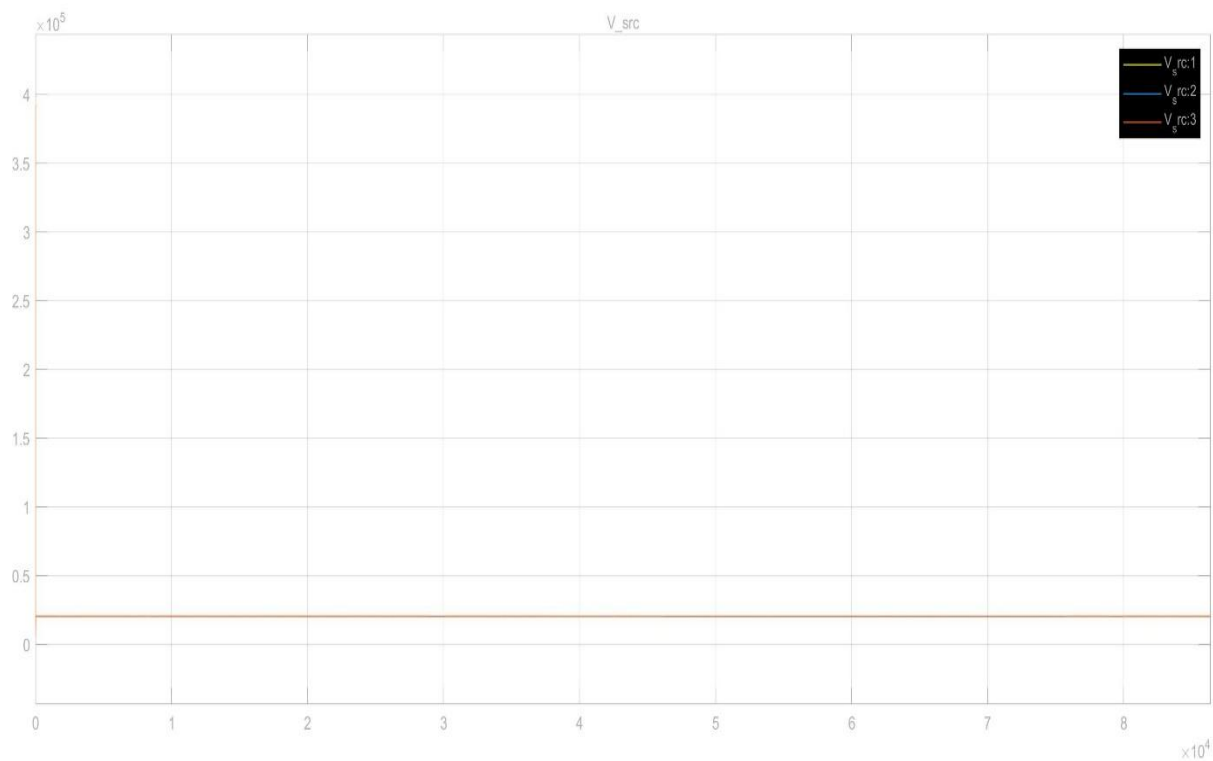


Figure III-12 : résultats de la tension de production du générateur diésel

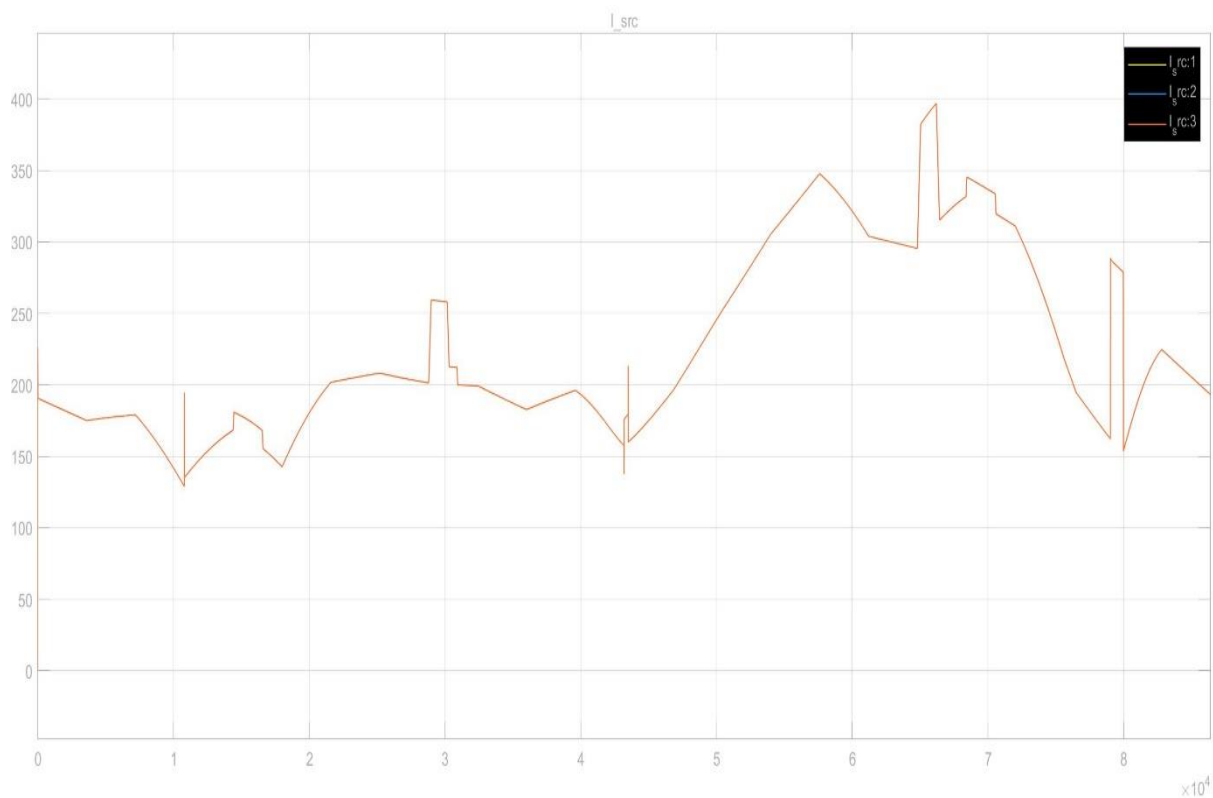


Figure III-13 : résultats de courant de production du générateur diésel

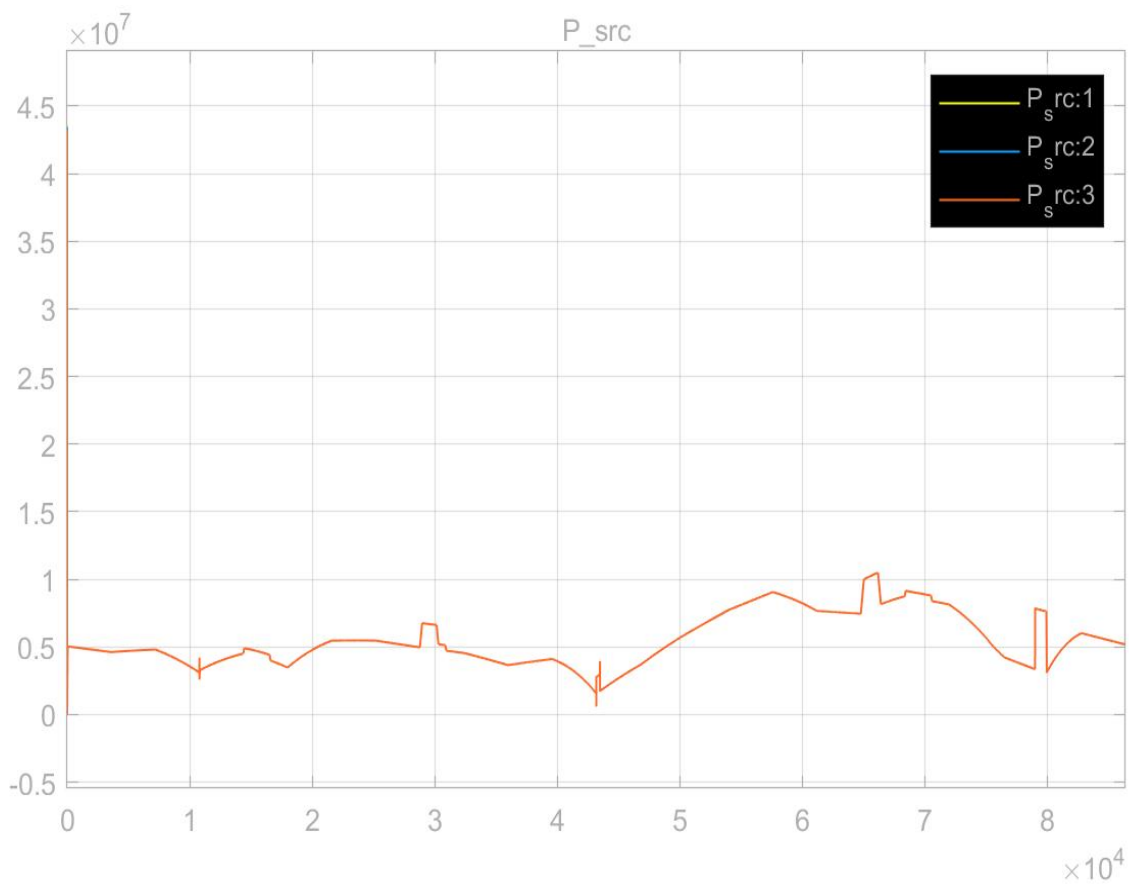


Figure III-14 : résultats de puissance active de production du générateur diesel

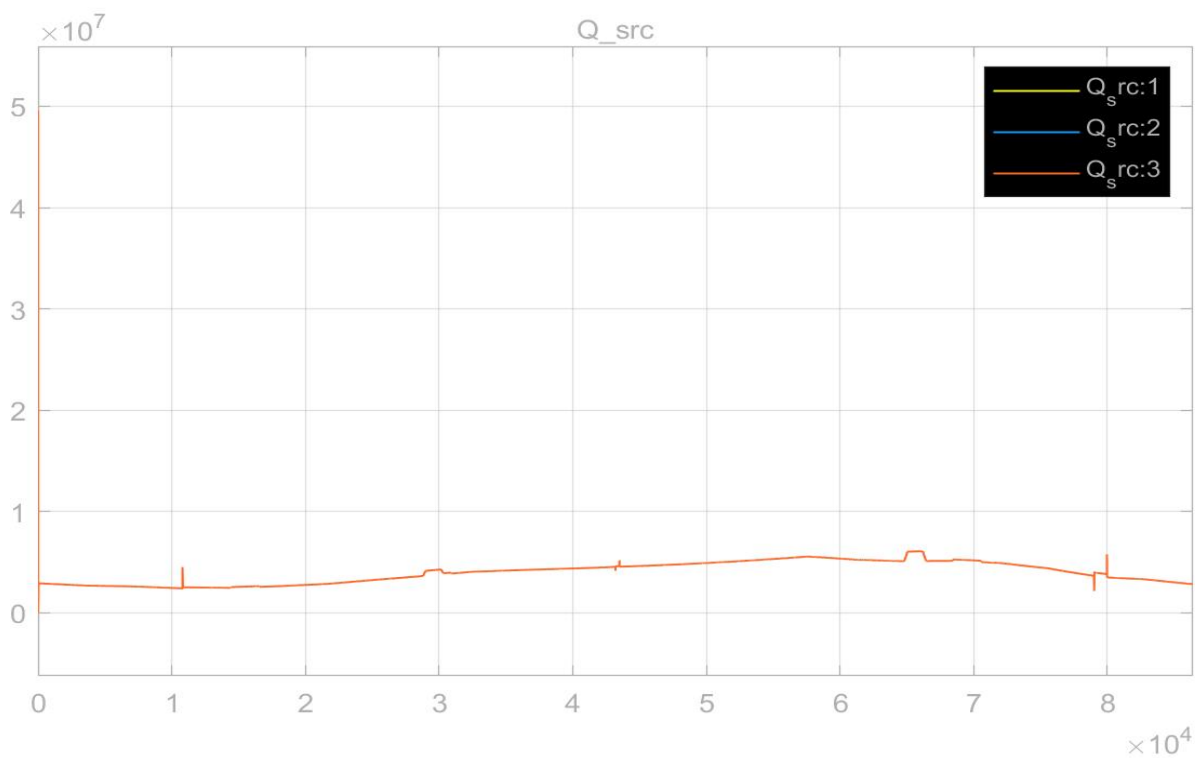


Figure III-15 : résultats de puissance reactive de production du générateur diesel

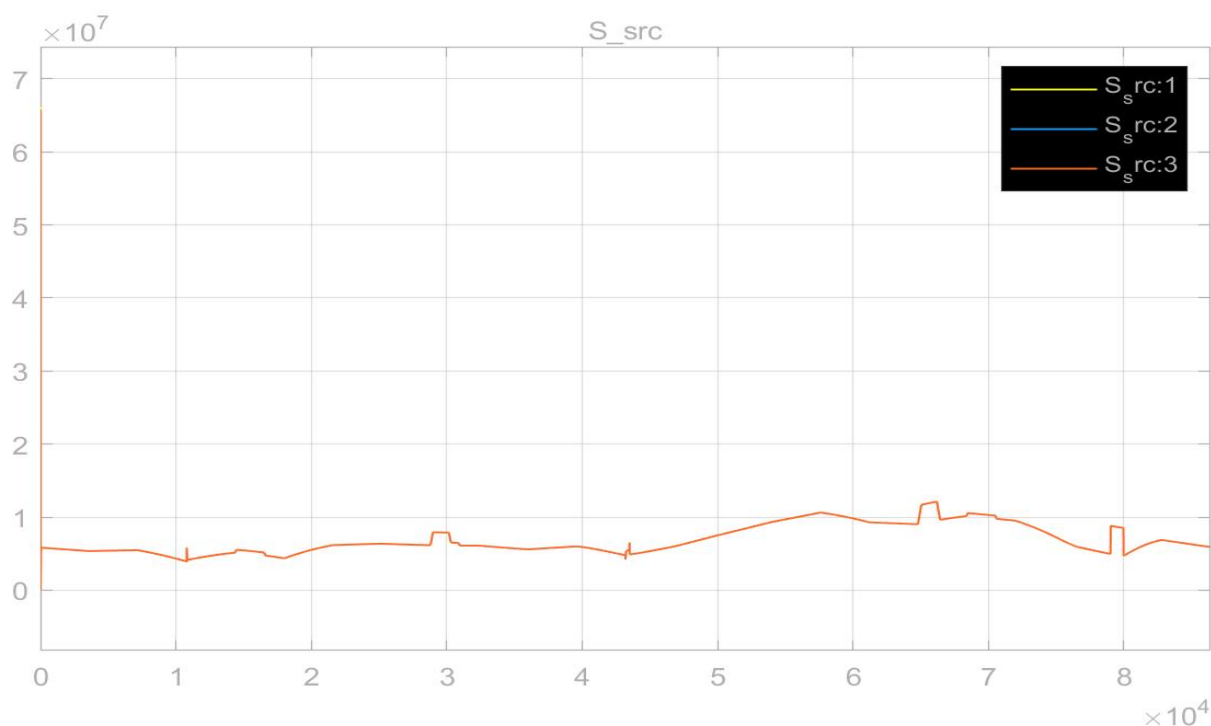


Figure III-16 : résultats de puissance totale de production du générateur diesel

3.4.1L'analyse des résultats de la simulation du générateur diesel :

On remarque L'influence de ces événements sur le fonctionnement du générateur diesel dans le système hybride PVED peut être expliquée comme suit :

a-Régulation de la Tension et de la Fréquence :

Le générateur diesel joue un rôle essentiel dans la régulation de la tension et de la fréquence du réseau électrique. Lorsque des variations de puissance surviennent en raison des changements de vitesse du vent ou de l'irradiance solaire, la tension et la fréquence du réseau peuvent être affectées. Le générateur diesel peut réagir rapidement en ajustant sa production pour maintenir la tension et la fréquence dans des limites acceptables, contribuant ainsi à la stabilité du réseau.

b-Variation de Courant et de Puissance en Fonction de la Vitesse du Vent

Pendant les heures où la vitesse du vent varie, le générateur diesel doit équilibrer les variations de production causées par les éoliennes. Par exemple, lorsque la vitesse du vent augmente dans l'intervalle [4 5] les éoliennes génèrent plus de puissance, ce qui entraîne une augmentation du courant et de la puissance active. Le générateur diesel ajuste sa production pendant ces périodes pour maintenir l'équilibre du réseau.

c-Diminution de la Production d'Énergie en Période de Vent Élevé

Dans l'intervalle [4 5] la vitesse du vent est élevée, ce qui conduit à une augmentation significative de la production d'énergie renouvelable. Pendant cette période, les éoliennes génèrent un pic de production d'énergie. Le générateur diesel est programmé pour réduire sa production afin de maximiser l'utilisation de l'énergie renouvelable et de réduire la consommation de carburant diesel.

d-Déconnexion Automatique de la Ferme Éolienne à 22 Heures

À 22 heures, lorsque la vitesse du vent atteint une limite prédéfinie de 15 m/s, la ferme éolienne se déconnecte automatiquement pour éviter les dommages aux équipements. Le générateur diesel doit alors augmenter sa production pour compenser la perte de puissance renouvelable et garantir la continuité de l'approvisionnement en électricité.

e-Variations de Courant et de Puissance en Fonction de l'Irradiance Solaire

Malgré la stabilité de la tension du réseau, les variations dans le courant et la puissance réactive et active sont observées tout au long des 24 heures en fonction de la variation de l'irradiance solaire. Par exemple, à midi (12h00), l'effet d'ombrage partiel réduit temporairement la production d'énergie solaire, ce qui entraîne une baisse du courant et de la puissance active. Le générateur diesel ajuste sa production pour compenser ces variations et maintenir l'équilibre du réseau.

En somme, le générateur diesel joue un rôle multifonctionnel et flexible dans le système hybride PVED, agissant comme une source d'énergie de secours, un régulateur de tension et de fréquence, et un équilibreur de la production d'énergie renouvelable en fonction des conditions météorologiques et des fluctuations de la demande. Dans le cadre de notre simulation et de notre analyse des données graphiques et des mesures de charge, nous avons observé que la charge est influencée par notre système énergétique hybride, comprenant les sources d'énergie photovoltaïque, éolienne et diesel. Cette influence est particulièrement notable pendant les périodes d'événements de disjonction survenant à midi, ainsi que lors de l'arrêt de l'éolienne à 22 heures. Nous avons également constaté une légère perturbation dans la consommation de charge à ces moments précis

3.5 Analyse des résultats de simulation de la charge :

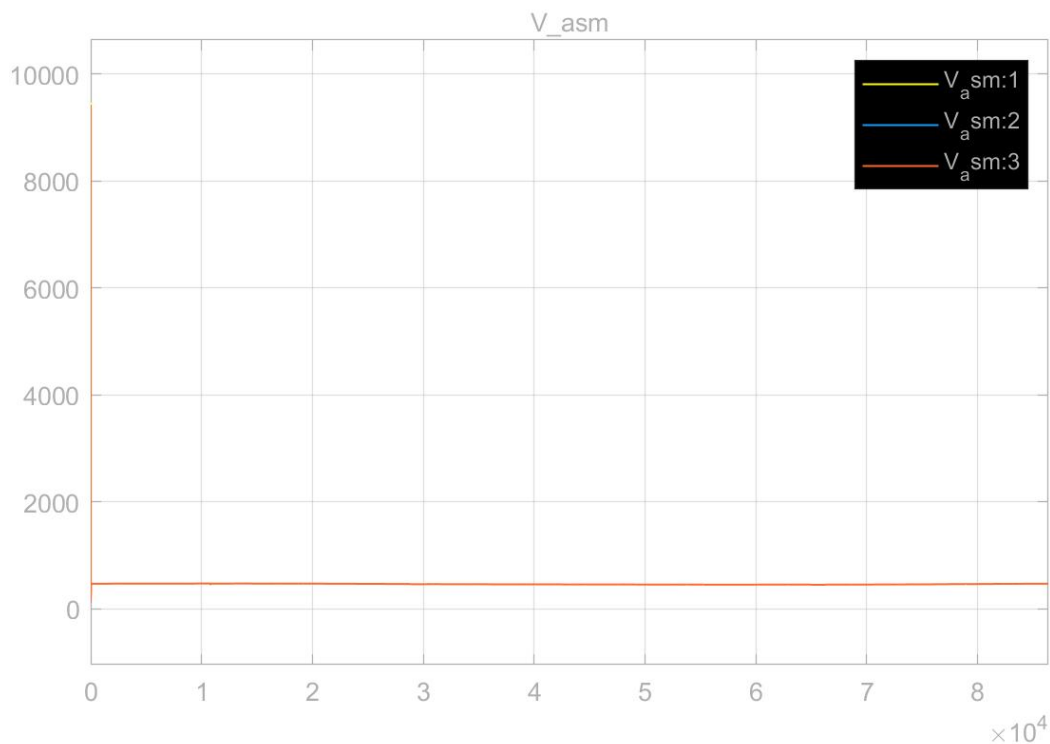


Figure III-17 : résultats de tension de production du asm

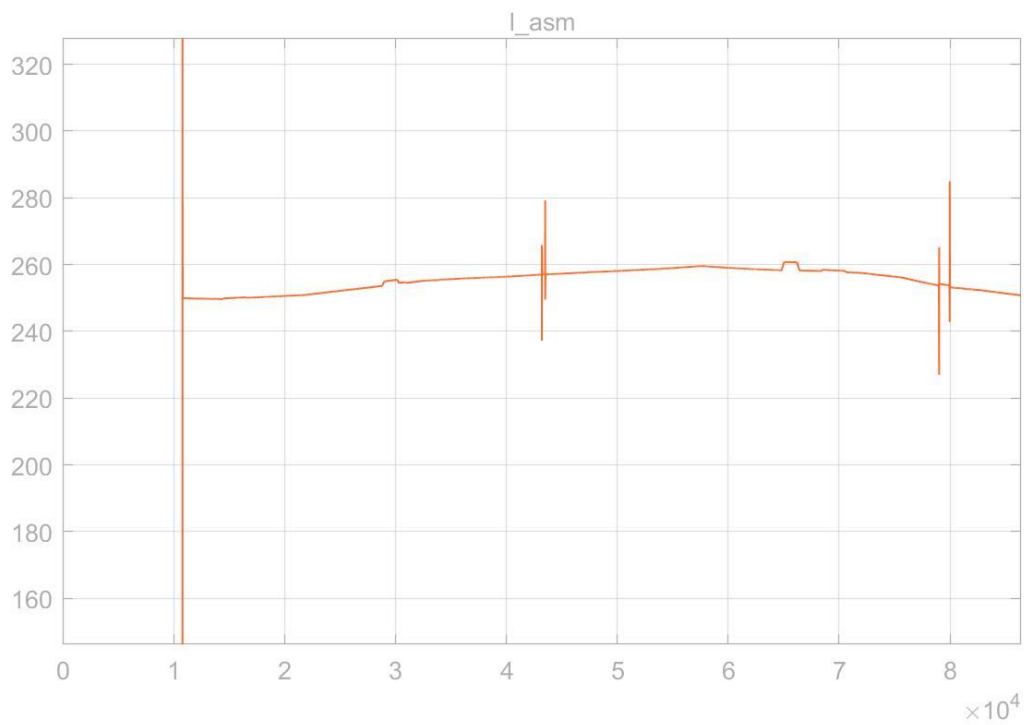


Figure III-18 : résultats de courant de production du asm

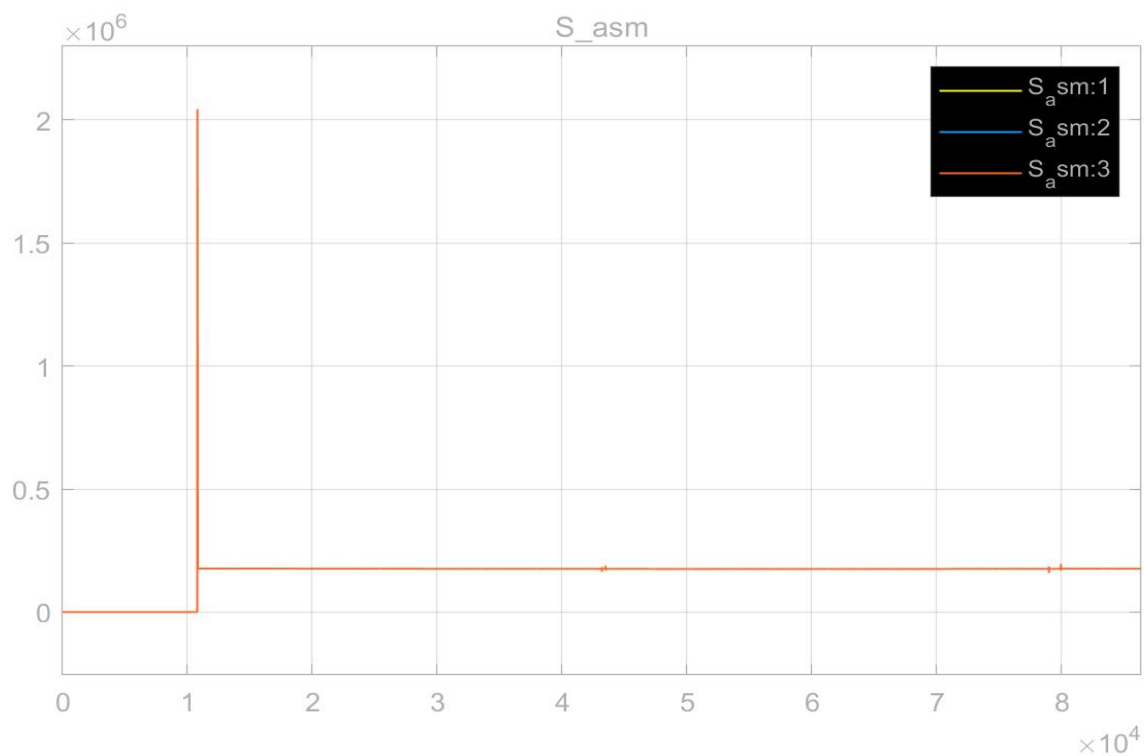


Figure III-19 : résultats de la puissance totale de production du asm

Nous avons remarqué que toutes les mesures de puissance et d'intensité étaient nulles au cours des trois premières heures, avant le démarrage de la machine asynchrone. Après le démarrage de cette dernière, nous avons constaté que la demande de charge contrôlait à la fois l'intensité et la puissance consommée.

En ce qui concerne la tension dans le réseau, il semble qu'elle soit restée stable tout au long de la période simulée.

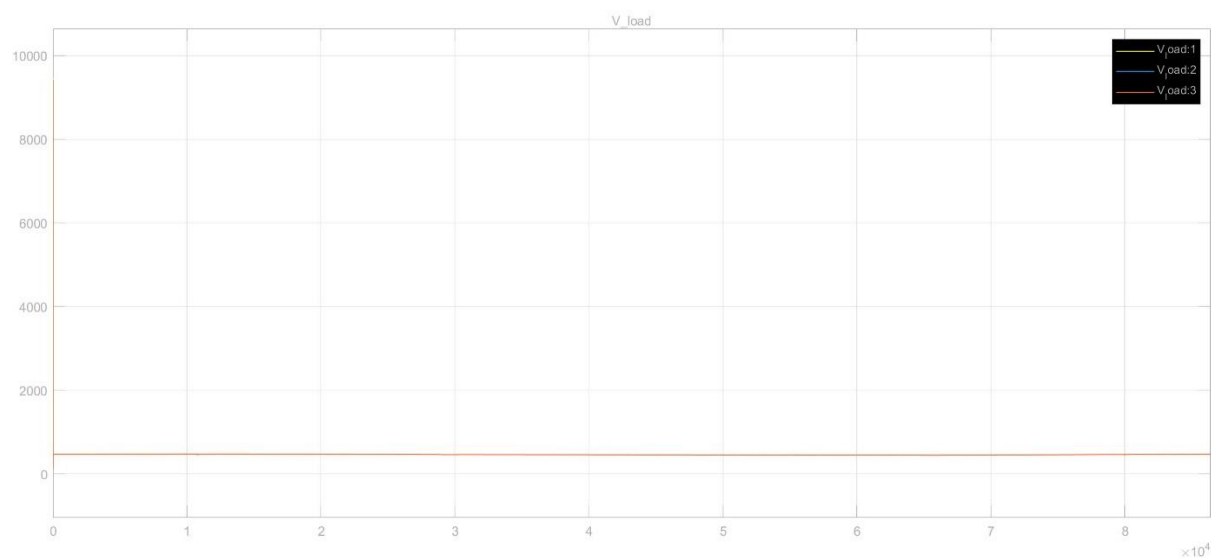


Figure III-20 : résultats de la tension de production du la charge résidentielle

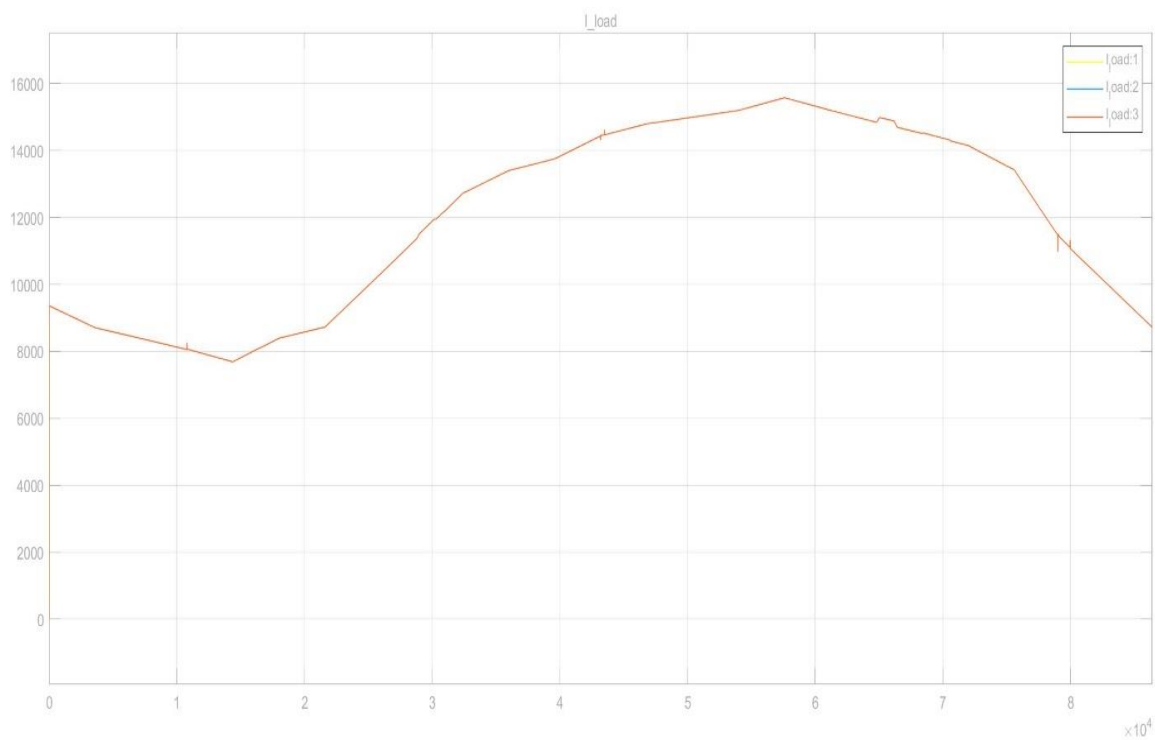


Figure III-21 : résultats de courant de production du la charge résidentielle

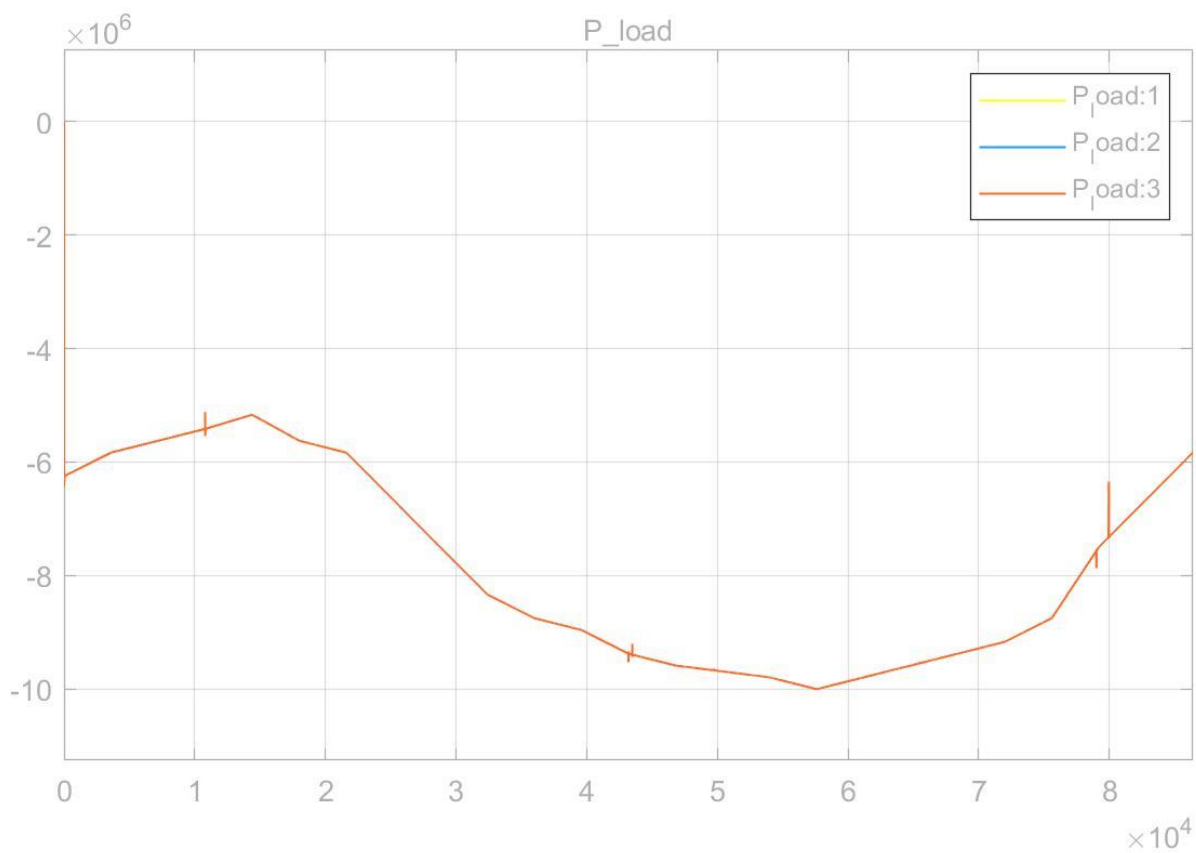


Figure III-22 : résultats de la puissance active de production du la charge résidentielle

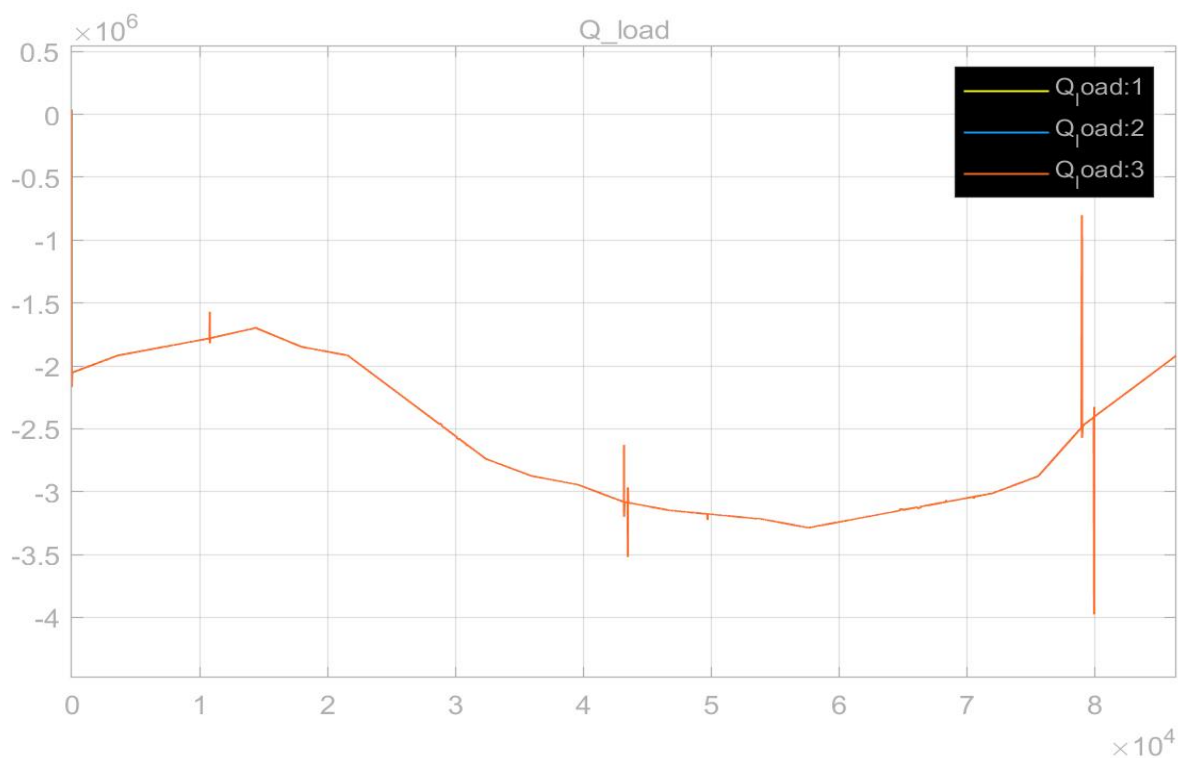


Figure III-23 : résultats de la puissance réactive de production du la charge résidentielle

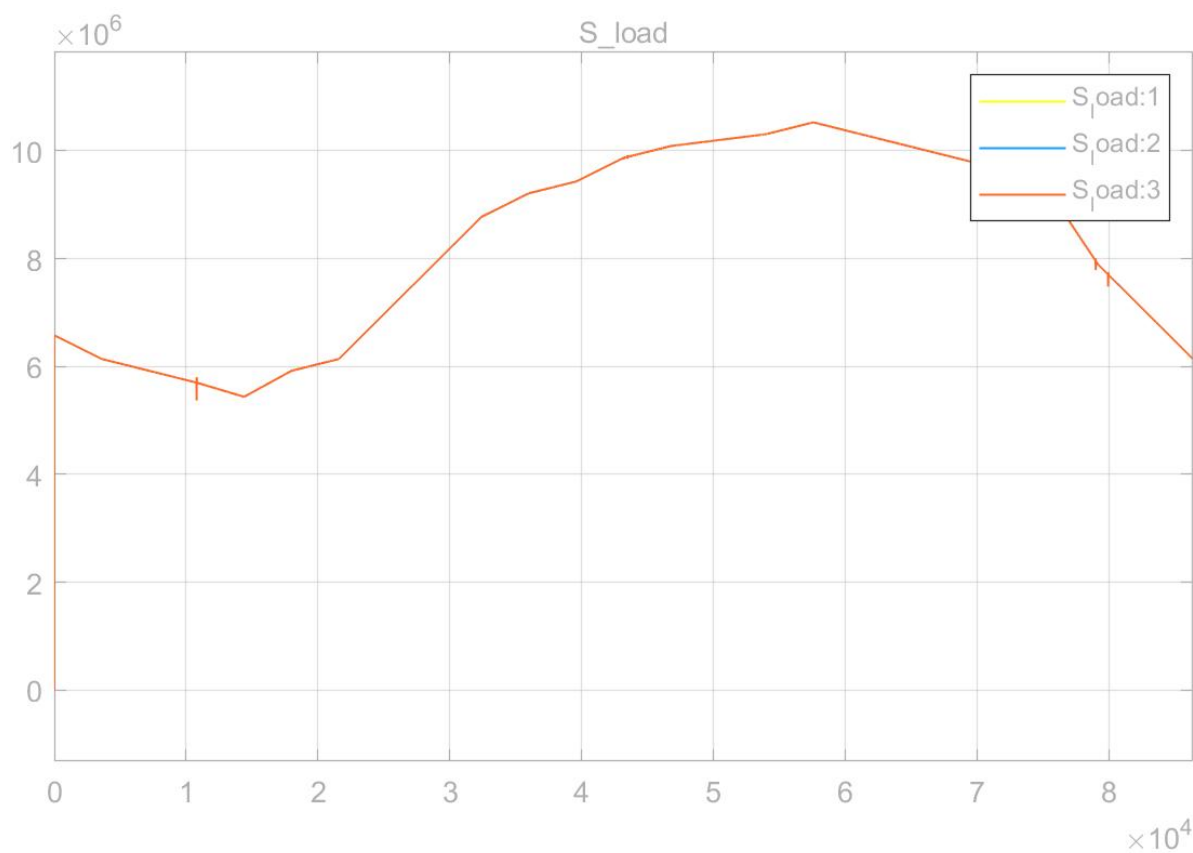


Figure III-24 : résultats de la puissance totale de production du la charge résidentielle

Dans le contexte on remarque que la tension demeure constante tout au long de la période de simulation pour la charge résidentielle. Cependant, la consommation de puissance varie en fonction de la demande de cette charge résidentielle, comme indiqué dans le tableau de consommation V2G.CONSUMPTION. Plus précisément, lorsque la demande de charge augmente, les mesures de puissance et d'intensité augmentent proportionnellement. En revanche, lorsque la demande de charge diminue, l'intensité et les mesures de puissances électriques diminuent en conséquence.

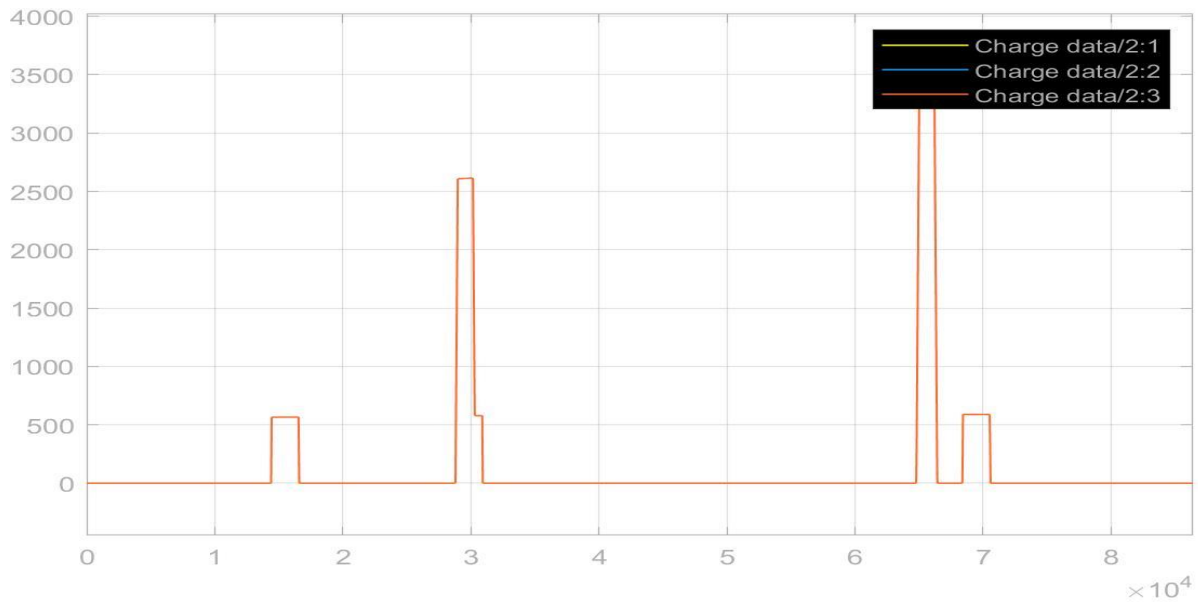


Figure III-25 : résultats de courant du système de véhicules électriques (V2G)

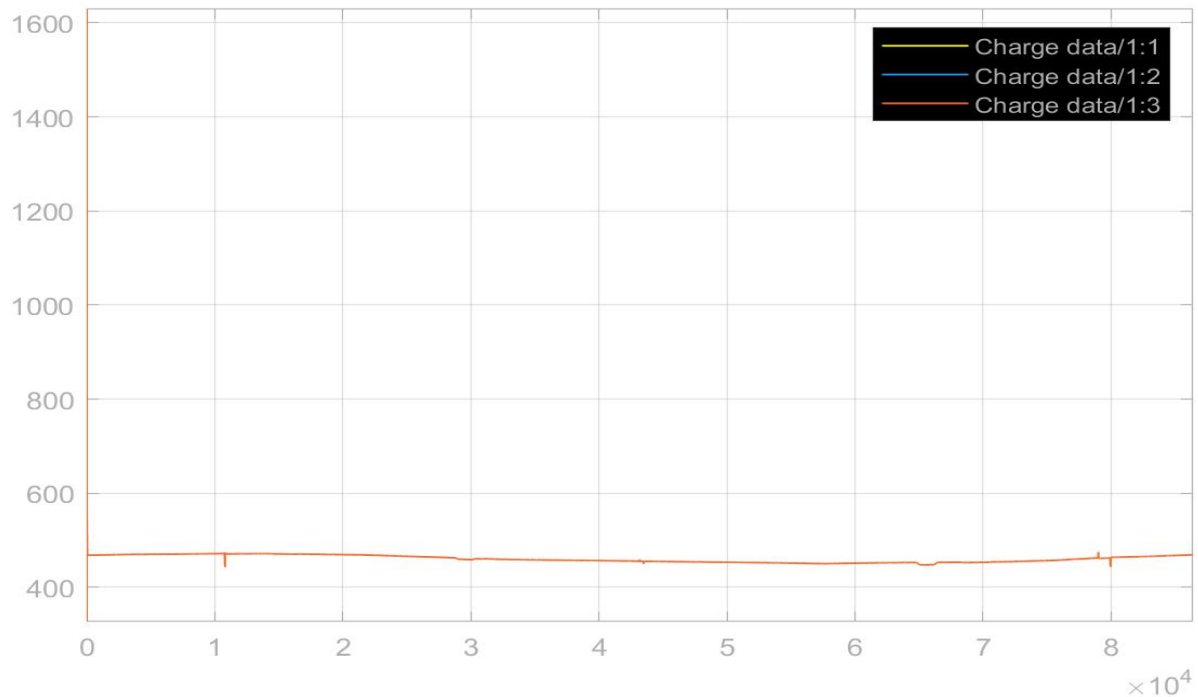


Figure III-26 : résultats de tension du système de véhicules électriques (V2G)

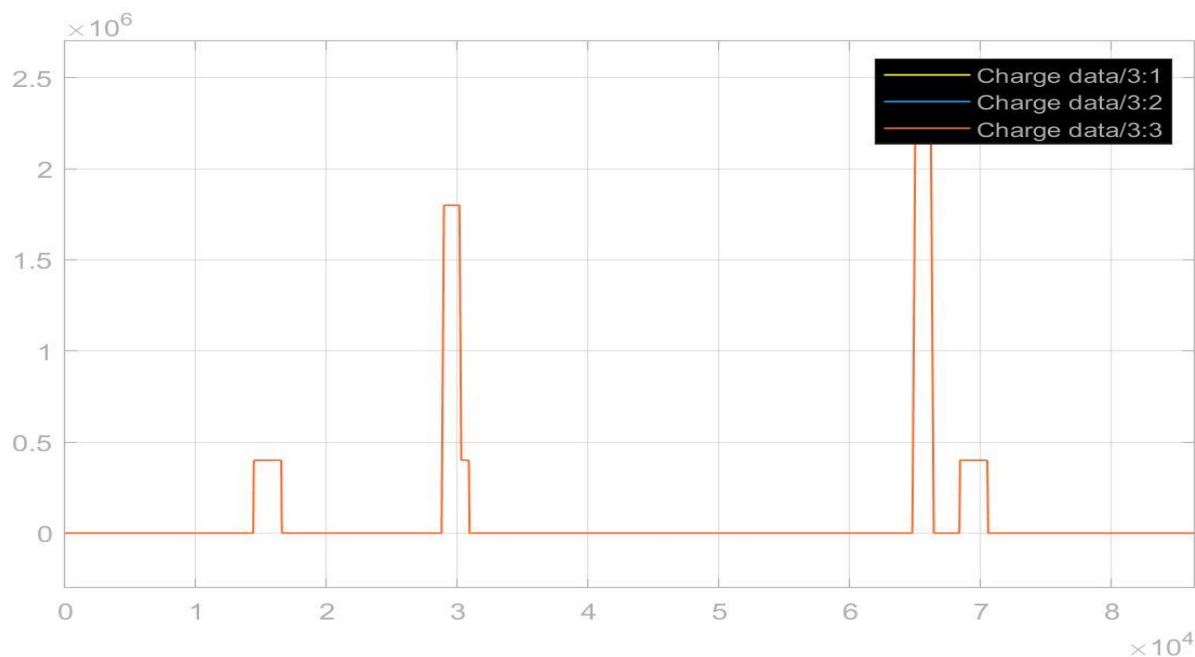


Figure III-27 : résultats de puissance totale du système de véhicules électriques (V2G)

La consommation du système de véhicules électriques (V2G) varie en fonction des différents profils d'utilisateurs tout au long de la journée. Chaque profil d'utilisateur a ses propres habitudes de déplacement, de charge et de consommation d'énergie, ce qui peut entraîner des variations significatives de la consommation d'énergie.

Puissance Active (Production et Consommation)

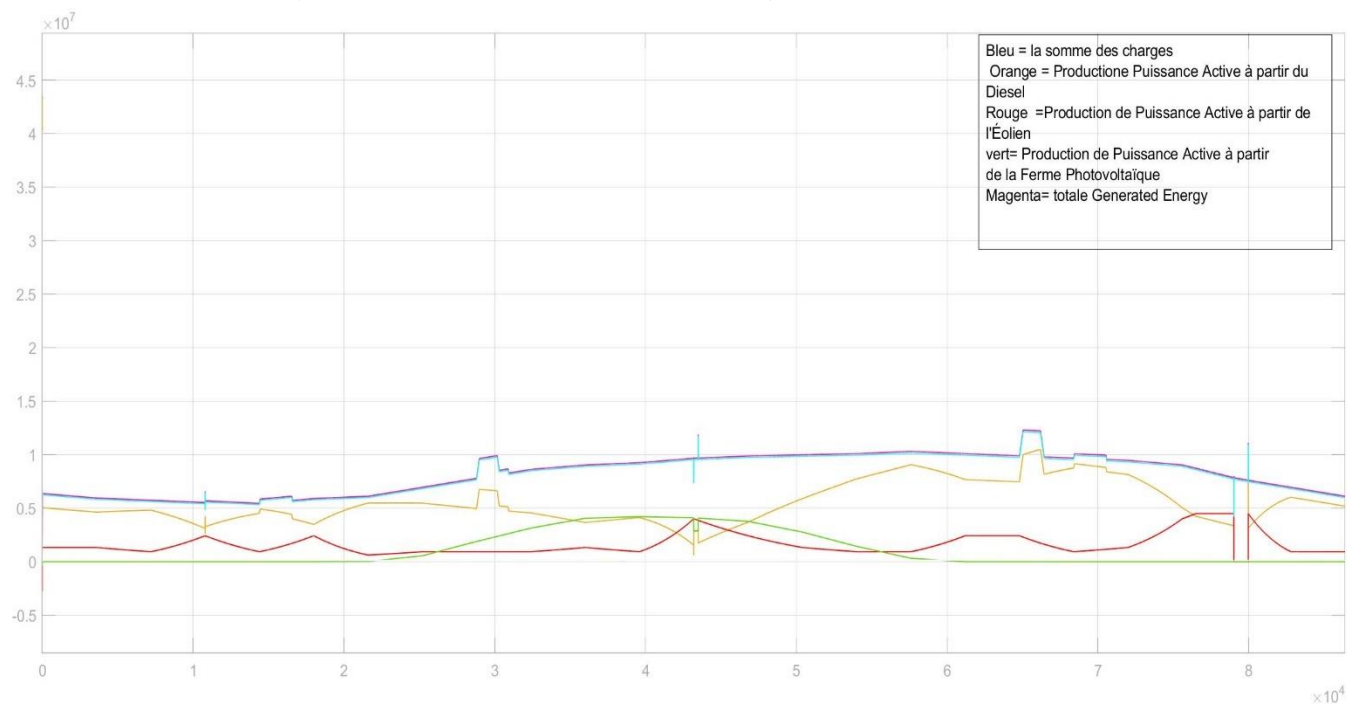


Figure III-28 : résultats de mesure de la consommation et production d'énergie active

Bleu = la somme des charges

Orange = Production de Puissance Active à partir du Diesel

Rouge = Production de Puissance Active à partir de l'Éolien

Vert = Production de Puissance Active à partir de la Ferme Photovoltaïque)

Magenta= Energy générée total

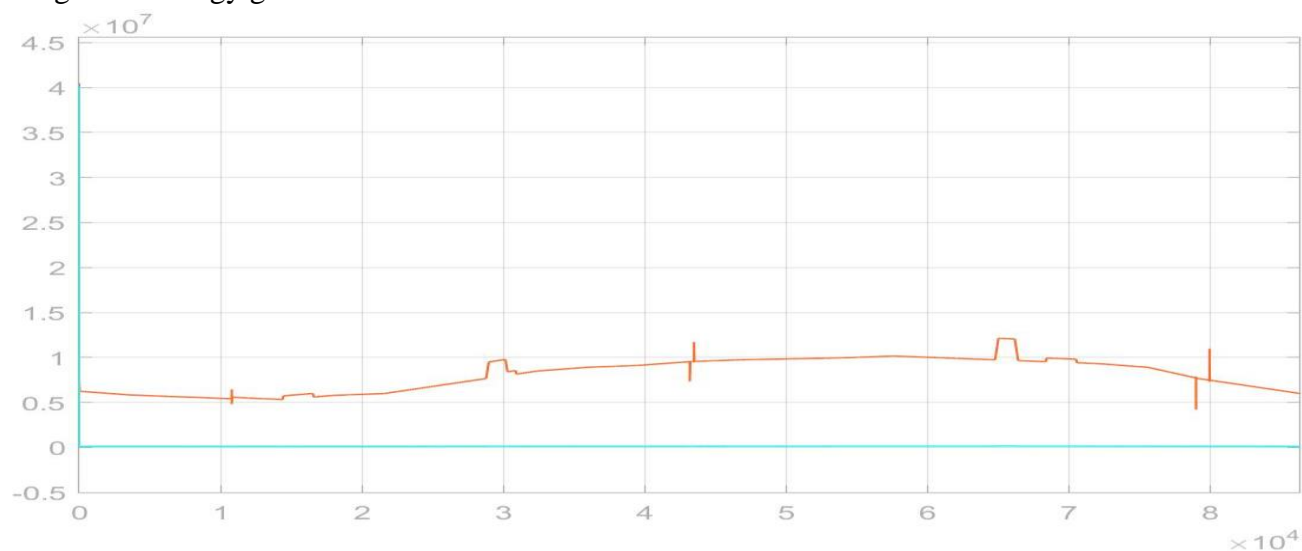


Figure III-29 : résultats de la somme d'énergie active de la consommation et production active

Puissance Réactive (Génération et Consommation)

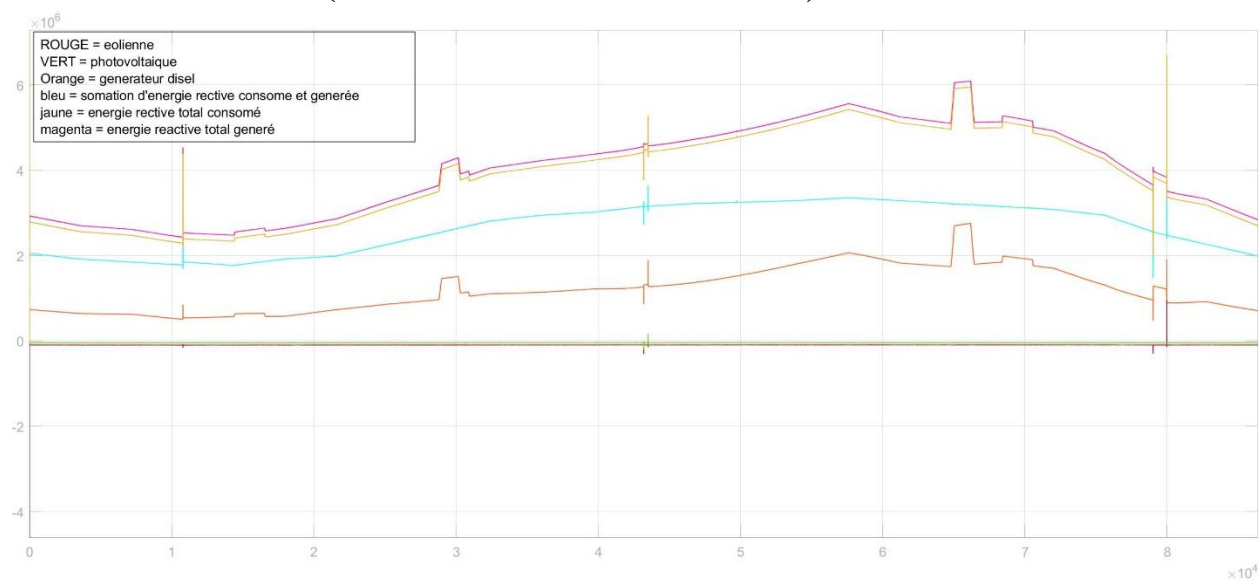


Figure III-30 : résultats de mesure de la consommation et production d'énergie réactive

Puissance Totale Générée et Consommée

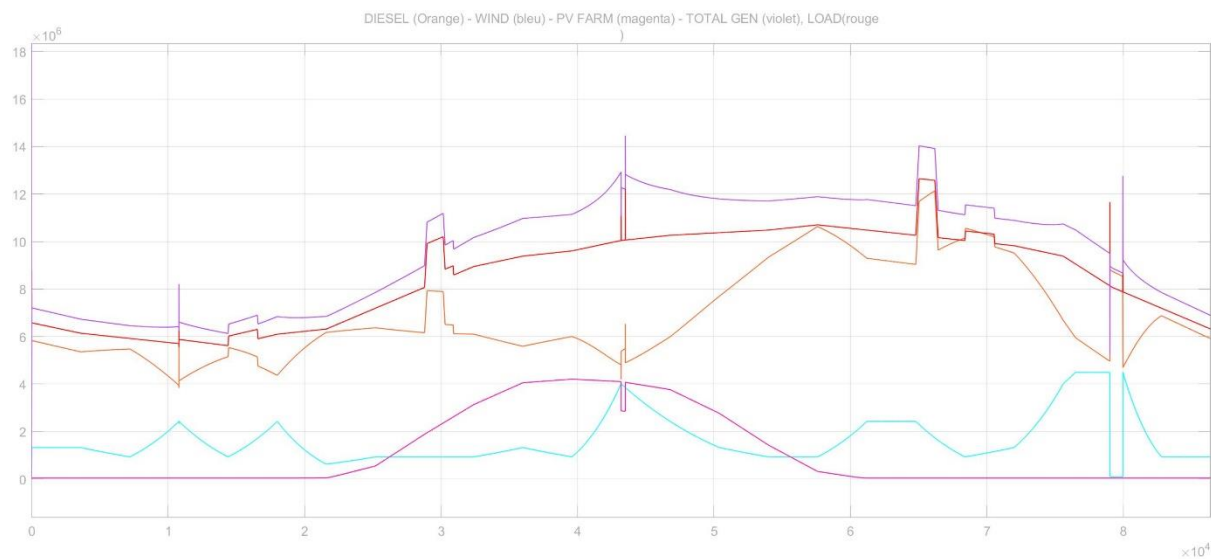


Figure III-32 : résultats de mesure de la consommation et production d'énergie Total

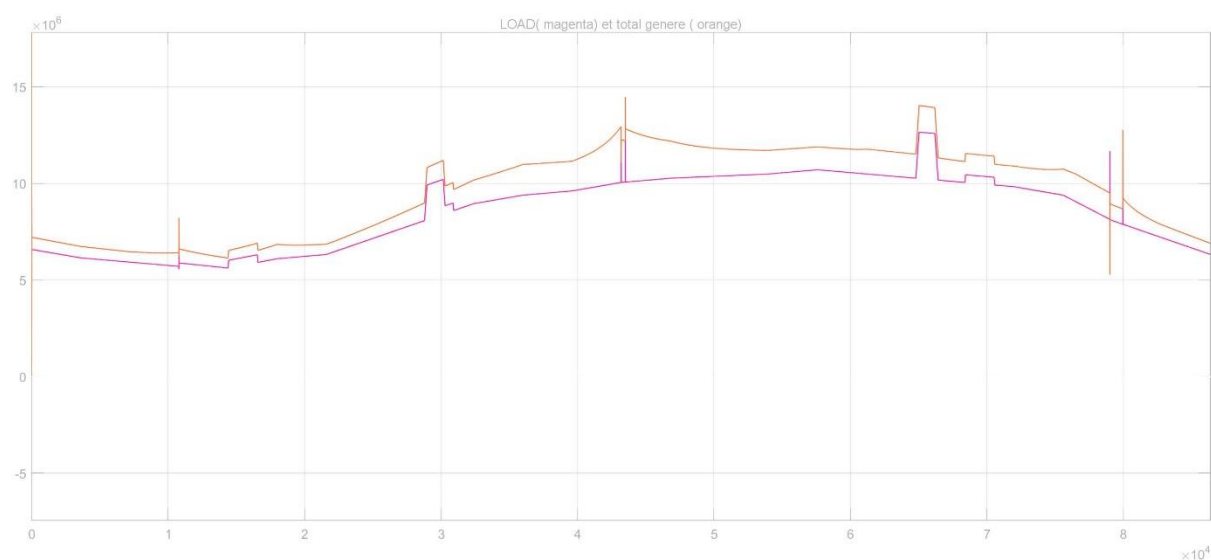


Figure III-33 : résultats de la somme de la consommation et production d'énergie Total

3.6 Conclusion et analyse général associée à la génération d'énergie :

En ce qui concerne la génération éolienne, il est à noter qu'une augmentation de la vitesse du vent entraîne systématiquement une augmentation du taux de production d'énergie sur une période de vingt-quatre heures. Les variations du vent tout au long de la journée se caractérisent par des pics et des creux multiples.

En ce qui concerne la génération d'énergie solaire, il convient de souligner qu'au cours de la simulation de vingt-quatre heures, l'intensité de l'énergie solaire suit une distribution normale,

atteignant son intensité maximale en milieu de journée. Il est à noter qu'une diminution de la production d'énergie est observée, liée à la présence de nuages dans le ciel, ce qui diminue l'intensité de l'énergie solaire reçue par les cellules solaires.

S'agissant de la génération d'énergie diesel, joue un rôle multifonctionnel et flexible dans le système hybride PVED, agissant comme une source d'énergie de secours.

Au cours de la simulation de la journée, des pics de consommation sont observés, attribuables à des anomalies dans la charge résidentielle.

Conclusion et analyse général associée à la consommation d'énergie :

La charge des consommateurs suit une tendance particulière, similaire à un modèle standard de consommation unitaire. La consommation augmente progressivement au cours de la journée, atteignant un pic en soirée, puis décroît lentement pendant la nuit à mesure que les charges sont progressivement désactivées.

Trois événements ont une influence sur la fréquence du réseau au cours de la journée : 1. Le démarrage précoce de la machine asynchrone à la troisième heure. 2. La présence de nuages qui réduit l'intensité de l'énergie solaire reçue par les cellules solaires. 3. La désactivation d'une ferme éolienne à 22 heures lorsque la vitesse du vent dépasse la puissance éolienne maximale autorisée.

L'état de charge de chaque profil de véhicule est également accessible dans le système. Un état de charge négatif indique que le véhicule est en déplacement ou n'est pas branché.

Conclusion générale

En conclusion, il est possible d'affirmer de manière académique que les systèmes hybrides combinant les sources d'énergie photovoltaïque, éolienne et diesel présentent des avantages substantiels par rapport aux systèmes classiques d'alimentation électrique. Cette conclusion est étayée par les observations suivantes :

a-Durabilité environnementale :

Le système hybride intègre des sources d'énergie renouvelable, notamment le photovoltaïque et l'éolien, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Cette caractéristique favorise la durabilité environnementale et la réduction de l'empreinte carbone, des éléments cruciaux dans le contexte actuel de préoccupation pour le changement climatique.

b- de l'alimentation :

La combinaison judicieuse de différentes sources d'énergie permet une alimentation électrique plus stable et fiable. Les fluctuations inhérentes à la production d'énergie renouvelable, telles que les variations dans l'ensoleillement et la vitesse du vent, sont efficacement compensées par la génération diesel, garantissant ainsi un approvisionnement continu en électricité. Cette stabilité de l'alimentation est essentielle pour maintenir les opérations critiques.

c-Réduction des coûts d'exploitation :

Les systèmes hybrides peuvent entraîner une réduction significative des coûts d'exploitation à long terme. L'exploitation des ressources d'énergie solaire et éolienne gratuites permet de minimiser les coûts associés à la production d'énergie. De plus, l'utilisation judicieuse de la génération diesel en fonction de la demande permet une utilisation plus efficace des ressources et des économies substantielles.

d-Adaptabilité aux conditions locales :

Les systèmes hybrides peuvent être configurés de manière à s'adapter précisément aux conditions environnementales et aux ressources énergétiques locales de chaque emplacement. Cette flexibilité les rend particulièrement appropriés pour les zones géographiques diverses, qu'il s'agisse de régions isolées ou d'espaces urbains, permettant ainsi une optimisation de la production d'énergie.

E- Réduction de la dépendance aux réseaux centraux :

Les systèmes hybrides offrent la possibilité de réduire la dépendance aux réseaux électriques centraux, ce qui peut s'avérer crucial dans des régions où les infrastructures traditionnelles sont peu fiables ou insuffisantes. Cette autonomie accrue contribue à la résilience et à la fiabilité de l'alimentation électrique.

En somme, sur la base de considérations académiques, il est plausible d'affirmer que les systèmes hybrides intégrant les sources d'énergie photovoltaïque, éolienne et diesel représentent une solution pratique, économiquement viable et respectueuse de l'environnement, surpassant les systèmes classiques d'alimentation électrique. Cette conclusion est étayée par une série d'observations et de paramètres énergétiques qui mettent en évidence leurs avantages significatifs dans divers contextes d'application.